



Universidad Autónoma Metropolitana  
Unidad Azcapotzalco

---

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

LONGITUD PLÁSTICA EN COLUMNAS  
ESBELTAS DE ACERO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
P R E S E N T A

**HEVER EUGENIO CHÁVEZ MORITA**

DIRECTOR DE TESIS: **DR. EMILIO SORDO ZABAY**

MÉXICO, D. F.

2013

## **Agradecimientos**

Primeramente doy gracias a Dios, por haberme dado fuerza y valor para terminar mis estudios de maestría.

A mi esposa e hijos, por su apoyo y comprensión, ya que me han dado la fuerza necesaria para poder concluir mi maestría, y que de forma incondicional entendieron mis ausencias y momentos difíciles.

A mis padres que me dieron todo el apoyo durante la realización de mi maestría y me acompañaron en esta aventura.

Al Dr. Emilio Sordo por brindarme su apoyo como director de la tesis durante el tiempo que tomó el desarrollo de la misma y por haber confiado en mí persona. También, aprovecho para expresar la motivación que de él se derivó por su ejemplo y dedicación.

Agradezco a la Dra. Consuelo Gómez y al Dr. Héctor Sánchez por su amable e incondicional ayuda con respecto a las valiosas sugerencias y comentarios derivados de la revisión exhaustiva de la tesis.

A mi jefe Rodolfo Ortiz por el apoyo brindado durante la terminación de mi tesis.

A la Universidad Autónoma Metropolitana, en especial al área de estructuras, por ofrecer una educación de calidad que me ha permitido desarrollar personal y profesionalmente.

Quiero expresar mi más sincero reconocimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante el tiempo de mis estudios de maestría.

Finalmente, pero no menos importante, reconozco el acompañamiento físico o en la distancia, de mis amigos, profesores y todas aquellas personas que en todo momento me brindaron su apoyo para seguir adelante, la lista resulta extensa por lo que no la describo. Así mismo, agradezco a todos aquellos que de alguna manera participaron durante la ejecución de esta investigación. A todos ellos, MIL GRACIAS.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 ANTECEDENTES.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 CUERPO DEL TRABAJO .....</b>	<b>2</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 VALIDACIÓN DEL MODELO DE ELEMENTO FINITO. ....</b>	<b>3</b>
<b>2.1.1 Modelo en Diana 9.1 .....</b>	<b>3</b>
<b>3. ANÁLISIS DE COLUMNAS ANTE CARGA MONÓTONA. ....</b>	<b>7</b>
<b>3.1 METODOLOGÍA .....</b>	<b>7</b>
<b>3.2 MODELOS .....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.1 Columnas sección maciza. ....</b>	<b>7</b>
<b>3.2.2 Columnas sección cajón.....</b>	<b>8</b>
<b>3.3 ANÁLISIS.....</b>	<b>10</b>
<b>3.4 RESULTADOS.....</b>	<b>11</b>
<b>3.4.1 Curvaturas .....</b>	<b>13</b>
<b>3.4.2 Curvaturas y ductilidad .....</b>	<b>15</b>
<b>3.4.3 Longitud de plasticidad .....</b>	<b>16</b>
<b>4. ANÁLISIS DE COLUMNAS ANTE CARGA CÍCLICA. ....</b>	<b>19</b>
<b>4.1 METODOLOGÍA .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2 MODELOS .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2.1 Columnas sección cajón.....</b>	<b>19</b>
<b>4.3 ANÁLISIS.....</b>	<b>21</b>
<b>4.3.1 Columnas T20 y T40, <math>d/d_y=1.4</math>.....</b>	<b>22</b>
<b>4.3.2 Columnas T20 y T40, <math>5\epsilon_y</math> .....</b>	<b>51</b>
<b>4.3.3 Longitud de plasticidad .....</b>	<b>68</b>
<b>5. ANÁLISIS DE COLUMNAS ANTE CARGA DINÁMICA. ....</b>	<b>72</b>
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>81</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>82</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

A pesar de que en los reglamentos de construcción existe una clasificación de las secciones transversales de un miembro estructural de acuerdo a su ductilidad, la complejidad del carácter dinámico de la acción sísmica genera grandes incertidumbres sobre el deterioro de la ductilidad del miembro. Es decir, son muchos los factores que pueden influir en este parámetro como, entre otros, los diferentes modos de pandeo y la interacción de éstos, la variación en el gradiente del diagrama de momentos debido al endurecimiento por deformación en la longitud de las articulaciones plásticas, cambios considerables en la distribución de momentos y de carga axial, la influencia de la esbeltez del miembro, y la reducción de la capacidad de rotación plástica debido a la presencia de las cargas axiales, entre otros. Como parte de un estudio más ambicioso, este trabajo estudia el efecto que produce la acción simultánea de la carga lateral y vertical en columnas de acero, para entender el comportamiento y las características de la distribución de curvaturas inelásticas. Trabajos posteriores definirán el efecto de otros parámetros como el endurecimiento por deformación, entre otros, en dichas distribuciones.

La predicción de la magnitud del daño sísmico que una estructura puede experimentar durante su vida útil, es controlada por el índice de daño, que se puede definir en función de rigidez, de ductilidad o de resistencia (Gioncu y Mazzolani, 2002). A nivel de ductilidad, este parámetro se refiere, al nivel de miembro, a la rotación plástica de la articulación. De acuerdo a Powell y Allahabadi (1988), para un miembro se puede calcular como la relación entre la rotación plástica requerida y la rotación plástica disponible:  $I_d = \theta_r / \theta_d$ . Posteriormente, se establecen correlaciones entre niveles de daño y estados límite. Sin embargo, es conocido que el problema del daño se vincula estrechamente con los valores y distribuciones de las curvaturas, que no son más que patrones de distribución de deformaciones, es por ello la importancia de poder entender qué zonas y con qué magnitudes se encuentran sometidas a curvaturas asociadas a fluencia del material.

Actualmente existe incertidumbre sobre la longitud en la que se deberán colocar atiesadores para asegurar el buen comportamiento de las articulaciones plásticas en columnas esbeltas con un nivel importante de carga axial, además que no existe claridad en el efecto de las relaciones  $P/P_{cr}$  y  $P/P_y$  para la estimación de la relación entre las rotaciones plásticas y las curvaturas desarrolladas por elementos esbeltos a flexocompresión.

### 1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo es discutir la influencia de la carga lateral y vertical en el cálculo de la longitud de desarrollo plástico en columnas esbeltas de acero de diversas secciones, sujetas a la aplicación simultánea de carga lateral y vertical.

Adicionalmente se plantean los siguientes objetivos secundarios relacionados.

- Determinar analíticamente la longitud plástica en columnas esbeltas de acero, para diferentes niveles de esbeltez ( $P/P_{cr}$ ) y de resistencia a la compresión ( $P/P_y$ ) de las mismas.
- Obtener tablas que consideren diversos valores de  $P/P_{cr}$  y  $P/P_y$  en el cálculo de la zona plástica desarrollada y la relación entre la rotación plástica y las curvaturas desarrolladas.
- Determinar analíticamente la longitud del tramo de columna en la que se deben colocar atiesadores.

### 1.3 CUERPO DEL TRABAJO

En el capítulo dos se describe la validación del modelo analítico, para el cual se realizaron dos modelos de elemento finito, con los programas de cómputo, ANSYS 11.0 y DIANA 9.1, con el fin de obtener el más adecuado a la representación del problema, y compararlo con el modelo analítico, para así obtener el más adecuado a la representación del problema. Asimismo se muestran las curvas comparativas de la curvatura en diferentes puntos a lo largo de la columna, obtenidas con el programa Diana, así como las analíticas obtenidas con Excel y Matlab.

En el capítulo tres se analiza la distribución de plasticidades en tres columnas sometidas a la acción de carga transversal monótona incremental bajo diferentes condiciones de carga axial. Para ello, se realizan simulaciones de elemento finito considerando las no linealidades geométricas y constitutivas asociadas al estudio. Se presentan tablas comparativas de la longitud plástica para diferentes ductilidades de las columnas.

En el capítulo cuatro se analiza la distribución de plasticidades de las columnas sometidas a la acción de carga transversal cíclica incremental bajo diferentes condiciones de carga axial. Para la cual también se realizan simulaciones de elemento finito considerando el comportamiento elostaplástico del material. Se presentan graficas de cortante contra desplazamiento, curvaturas y longitud plástica para diferentes relaciones de ductilidades de las columnas.

Finalmente en el último capítulo de este trabajo se analizan las columnas sometidas ante carga dinámica, dichos análisis se efectuaron con el espectro SCT-85.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En este trabajo se estudia el efecto que produce la acción simultánea de la carga vertical y lateral en columnas de acero, para entender el comportamiento y las características de la distribución de curvaturas inelásticas, para lo cual se toman en cuenta el efecto de las cargas incrementales, cíclicas y dinámicas para diferentes niveles de desplazamiento objetivo.

Debido a que necesitamos representar el comportamiento real de la columna que se está estudiando se recurrió a realizar simulaciones de elemento finito, con la finalidad de que se puedan considerar las no linealidades geométricas y constitutivas asociadas al estudio.

El utilizar un modelo de elemento finito, nos da muchas ventajas, ya que podemos evitar realizar ensayos experimentales, los cuales son muy costosos, además de que es muy complicado llevarlos a cabo por problemas de espacio o la limitación de los recursos del laboratorio, también podemos realizar simulaciones considerando diversos parámetros como son diversos tipos de secciones de acero, sometidas a diversas condiciones de carga y apoyo. Para llevar a cabo este análisis se realizaron dos modelos de elemento finito con los programas de cómputo, ANSYS 11.0 y DIANA 9.1, con el fin de obtener el más adecuado a la representación del problema.

### 2.1 VALIDACIÓN DEL MODELO DE ELEMENTO FINITO.

Se llevaron a cabo dos modelos de elemento finito, los cuales se validaron con un modelo analítico, el cual se realizó a través de las ecuaciones de la mecánica de materiales. En ambos modelos de elemento finito se discretizó la columna convenientemente, tanto en longitud como en la sección transversal, para asegurar la consideración adecuada de las no linealidades tanto geométricas como del material, el cual se consideró con una relación constitutiva esfuerzo-deformación elastoplástica perfecta.

Se utilizaron procesos de incremento paulatino de desplazamiento para obtener, en diversas etapas del mismo, los valores de cortantes, desplazamientos y curvaturas de las secciones transversales en diferentes puntos de la columna.

#### 2.1.1 Modelo en Diana 9.1

En Diana 9.1, se utilizó el elemento viga L7BEN de la figura 1, que es un elemento clase II, que se caracteriza por plantear la hipótesis de secciones planas y de ignorar los efectos de cortante.

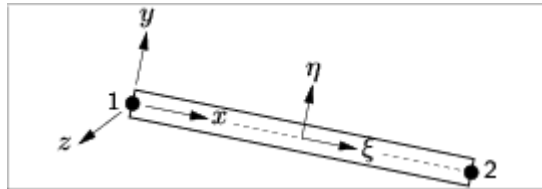


Figura 1. Elemento L7BEN - recto, 2 nodos, 2-D.

## Capítulo 2. Planteamiento del problema

Class Theory Type	Class-I <i>Bernoulli</i>		Class-II <i>Bernoulli</i>		Class-III <i>Mindlin-Reissner</i>						
	L6BEN	L12BE	L7BEN	L13BE	CL9BE	CL12B	CL15B	CL18B	CL24B	CL30B	
Dimension	2D	3D	2D	3D	2D	2D	2D	3D	3D	3D	
Straight/Curved	str.	str.	str.	str.	cur.	cur.	cur.	cur.	cur.	cur.	
Nr. of nodes	2	2	2	2	3	4	5	3	4	5	
Nr. of d.o.f.	6	12	7	13	9	12	15	18	24	30	
Variables <sup>1</sup>	$u_x$	1	1	2	2	2	3	3	2	3	4
	$u_y$	3	3	3	3	2	3	3	2	3	4
	$u_z$		3		3				2	3	4
	$\phi_x$		×		×				2	3	4
	$\phi_y$		×		×				2	3	4
	$\phi_z$	×	×	×	×	2	3	3	2	3	4
	$\Delta u_x$			×	×						
Primary strains	$\Delta u$ $\kappa$	$\Delta u$ $\Delta \phi$ $\kappa$	$\varepsilon$ $\gamma$	$\varepsilon$ $\gamma$	$\varepsilon$ $\gamma$	$\varepsilon$ $\gamma$	$\varepsilon$ $\gamma$	$\varepsilon$ $\gamma$	$\varepsilon$ $\gamma$	$\varepsilon$ $\gamma$	
Primary stresses	$N$ $M$ $Q$	$N$ $M$ $Q$	$\sigma$	$\sigma$	$\sigma$	$\sigma$	$\sigma$	$\sigma$	$\sigma$	$\sigma$	
Shear deformation	option <sup>2</sup>	option	no	no	yes	yes	yes	yes	yes	yes	
Numerically integrated cross-section	no	no	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	
Numerically integrated along beam axis	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	

Table 4.1: OVERVIEW OF BEAM ELEMENTS

<sup>1</sup> Numbers 1–4 for interpolation order, × for ‘derived’.

<sup>2</sup> Optionally, the L6BEN element includes the effects of shear deformation according to the *Timoshenko* theory.

Figura 2. Características de los elementos viga.

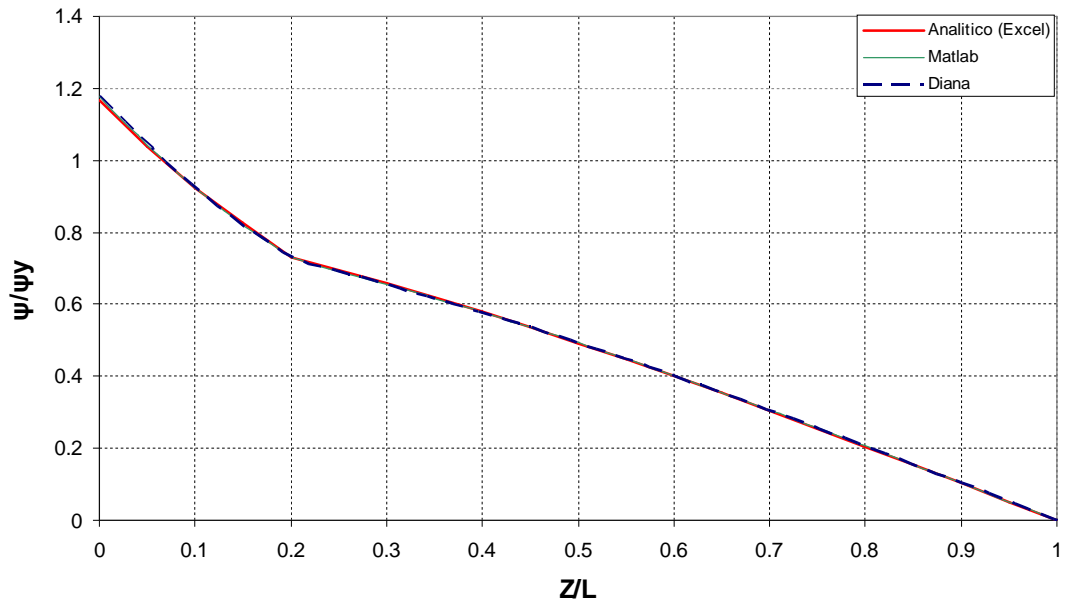
### Columna I P/Py=0.3 P/Pcr=0.5

d/dy	z/L	$\psi/\psi_y$ (Analítico)	$\psi/\psi_y$ (Matlab)	$\psi/\psi_y$ (Diana)
0.25	0	0.23	0.23	0.23
0.5	0	0.46	0.46	0.46
1	0	1.17	1.18	1.18
1.5	0	2.49	2.55	2.57
2	0	4.22	4.38	4.51
2.1	0	4.57	4.87	4.88
2.2	0	4.97	5.36	5.31

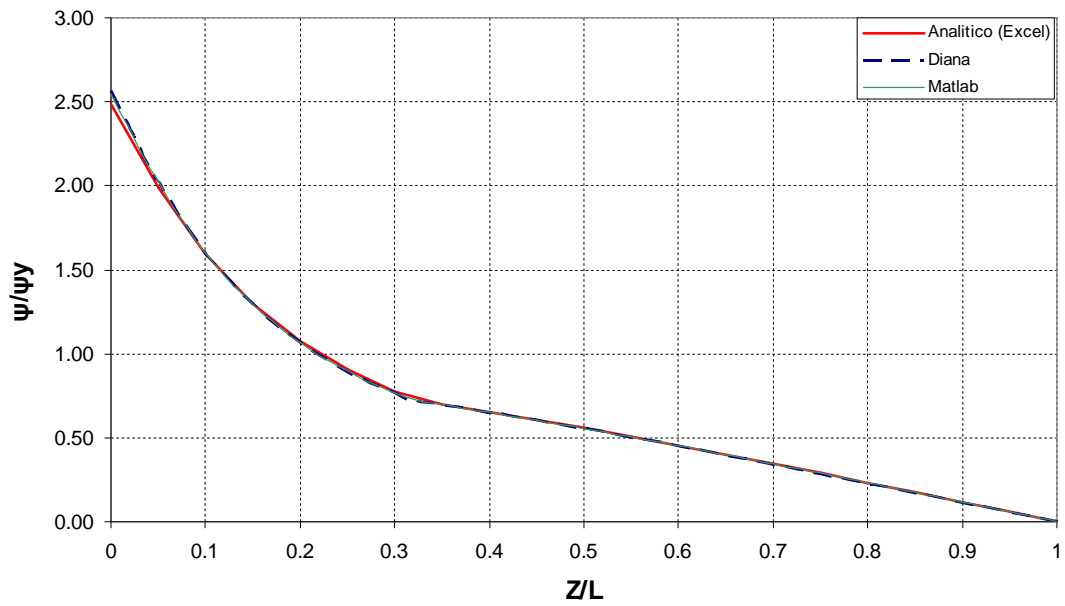
Comparación de los valores de curvaturas en el empotramiento.

## Capítulo 2. Planteamiento del problema

Columna I  $P/P_y=0.3$   $P/P_{cr}=0.5$  ( $d/d_y=1.0$ )



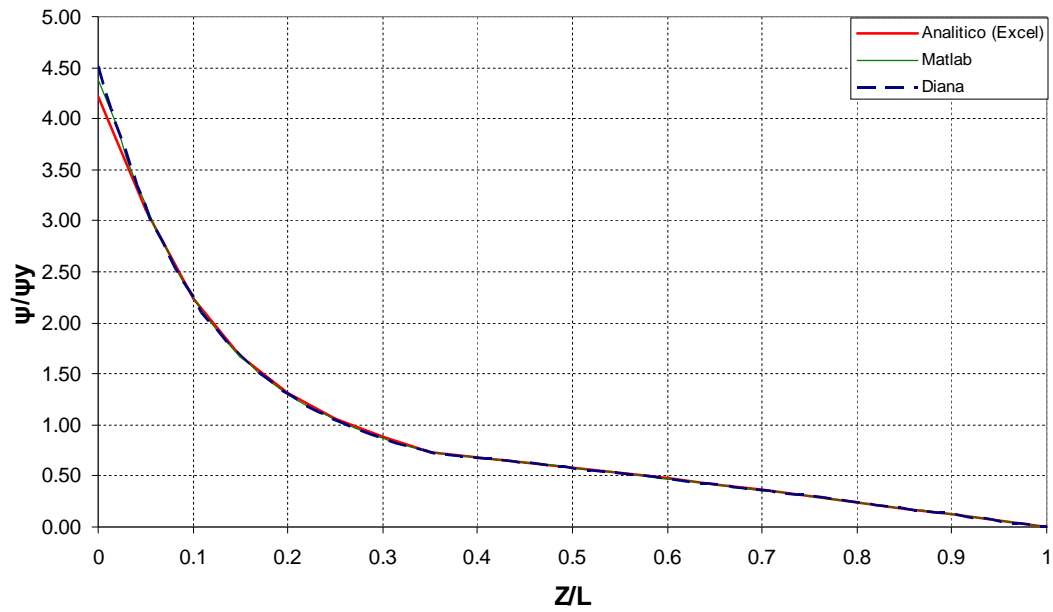
Columna I  $P/P_y=0.3$   $P/P_{cr}=0.5$  ( $d/d_y=1.5$ )



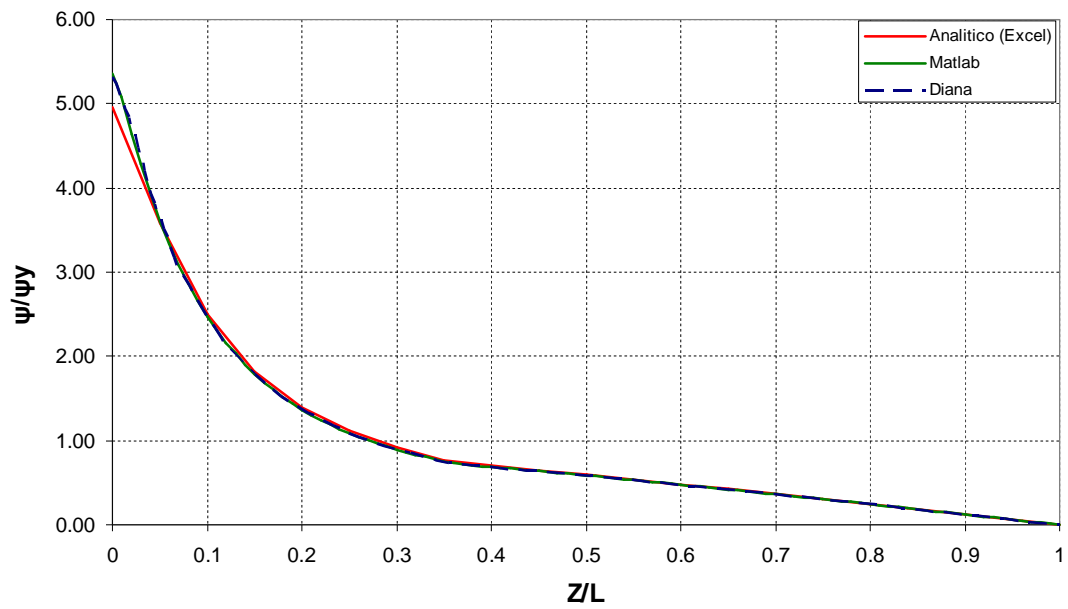


## Capítulo 2. Planteamiento del problema

Columna I  $P/Py=0.3$   $P/P_{cr}=0.5$  ( $d/dy=2.0$ )



Columna I  $P/Py=0.3$   $P/P_{cr}=0.5$  ( $d/dy=2.2$ )



### 3. ANÁLISIS DE COLUMNAS ANTE CARGA MONÓTONA.

En este capítulo se analiza la distribución de plasticidades en tres columnas sometidas la acción de carga transversal incremental bajo diferentes condiciones de carga axial. Para ello, se realizan simulaciones de elemento finito considerando las no linealidades geométricas y constitutivas asociadas al estudio. Se consideraron diversas longitudes de columna de forma que la carga vertical tenga diferentes proporciones con la carga de fluencia  $P_y$  y la carga crítica de pandeo  $P_{cr}$ . A continuación se describe la metodología utilizada para la realización del estudio, así como los resultados obtenidos.

#### 3.1 METODOLOGÍA

Se establecieron los parámetros que definen las características de las secciones transversales a considerar de forma que fueran secciones compactas. Después se consideraron diferentes longitudes de columna de forma que se obtuvieran diferentes relaciones de la carga axial con la carga de fluencia  $P_y$  y la carga crítica de pandeo  $P_{cr}$ . Las columnas definidas se representaron mediante un modelo de elemento finito, en el cual se proporciono la carga lateral mediante un control de desplazamientos. Finalmente se obtuvieron relaciones de la curvatura promedio con la longitud de la columna. En forma paralela se registró la dimensión del tramo con plasticidad del material y se obtuvieron graficas comparativas del cortante aplicado contra el desplazamiento

#### 3.2 MODELOS

##### 3.2.1 Columnas sección maciza.

En primer lugar se estudio una sección rectangular maciza mostrada en la figura 1, de ancho  $b=10$  cm y altura  $h=10$  cm, área  $A=bh$  y momento de inercia  $I=bh^3/12$ , denominada M10. La longitud de columna que se considero depende de las relaciones de la carga axial con la carga de fluencia  $P_y$  y la carga crítica de pandeo  $P_{cr}$ . El material que se utilizó es elastoplástico con módulo de elasticidad  $E=2038901.9$  kg/cm<sup>2</sup>, esfuerzo de fluencia  $\sigma_y=2530$  kg/cm<sup>2</sup>, deformación de fluencia  $\epsilon_y = \sigma_y/E$ . La carga de fluencia de la sección es  $P_y = A\sigma_y$ , la carga crítica de pandeo  $P_{cr} = \Pi^2 EI / (KL)^2$ , y el momento plástico  $M_p = bh^2 \sigma_y / 4$ .

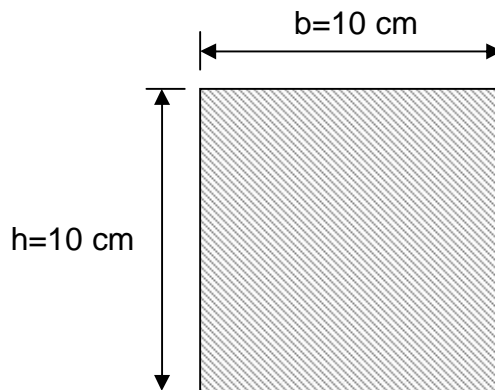


Figura 1. Sección maciza, M10.

Columna	Carga axial, P (kg)	P/P <sub>cr</sub>	P/Py	Longitud (cm)
M10C5Y5	126500	0.5	0.5	130
M10C5Y1	25300	0.5	0.1	290
M10C1Y5	126500	0.1	0.5	60
M10C1Y1	25300	0.1	0.1	130
M10C0Y0L60	0	0	0	60
M10C0Y0L130	0	0	0	130
M10C0Y0L290	0	0	0	290

*Características de la columna de sección maciza M10.*

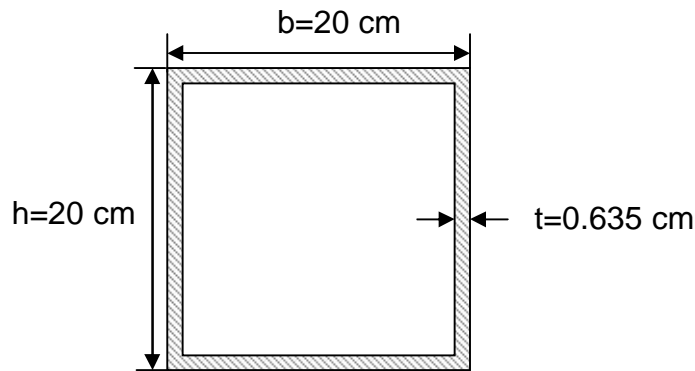
### 3.2.2 Columnas sección cajón

Se estudiaron dos secciones cajón cuadradas, con un ancho b, altura h, espesor t, área  $A=2ht+2*(h-2t)t$  y momento de inercia  $I=2*(ht/12+ht*(h/2-t/2)) + 2*(t*(h-2t)^3/12)$ . La longitud de la columna depende de las relaciones de carga axial con la carga de fluencia Py y la carga crítica de pandeo Pcr. El material que se utilizó es elastoplástico, el cual tiene las mismas propiedades que el de la sección maciza.

Se tuvo que garantizar que la sección sea compacta (Tipo 2), la cual no debe exceder la siguiente relación ancho/grueso:

$$1.12\sqrt{E/\sigma_y}$$

Para las dos secciones cajón, el momento plástico se cálculo de acuerdo a la teoría de mecánica de materiales. La primera sección cajón mostrada en la figura 2 tiene un ancho b=20 cm, altura h=20 cm, espesor t=0.635 cm, denominada T20, y la segunda sección de la figura 3 tiene un ancho b=40 cm, altura h=40 cm, espesor t=0.635 cm, denominada T40.

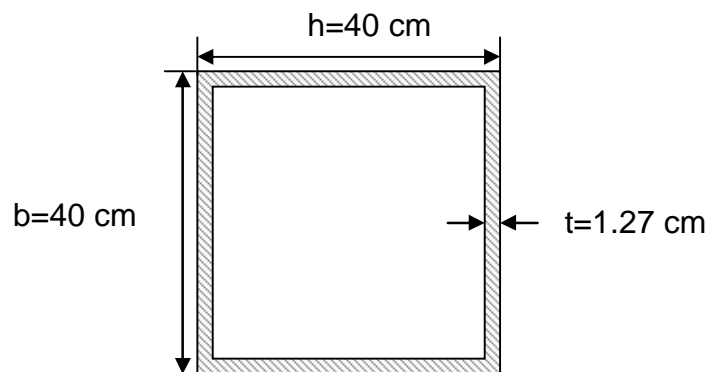


*Figura 2. Sección cajón, T20.*

### Capítulo 3. Análisis de columnas ante carga monótona

Columna	Carga axial, P (kg)	P/P <sub>cr</sub>	P/P <sub>y</sub>	Longitud (cm)
T20C5Y5	62000	0.5	0.5	355
T20C5Y3	37300	0.5	0.3	455
T20C5Y1	12400	0.5	0.1	790
T20C3Y5	62000	0.3	0.5	275
T20C3Y3	37300	0.3	0.3	355
T20C3Y1	12400	0.3	0.1	610
T20C1Y5	62000	0.1	0.5	160
T20C1Y3	37300	0.1	0.3	205
T20C1Y1	12400	0.1	0.1	355
T20C0Y0L160	0	0	0	160
T20C0Y0L205	0	0	0	205
T20C0Y0L275	0	0	0	275
T20C0Y0L355	0	0	0	355
T20C0Y0L455	0	0	0	455
T20C0Y0L610	0	0	0	610
T20C0Y0L790	0	0	0	790

*Características de la columna de sección cajón T20.*



*Figura 3. Sección cajón, T40.*

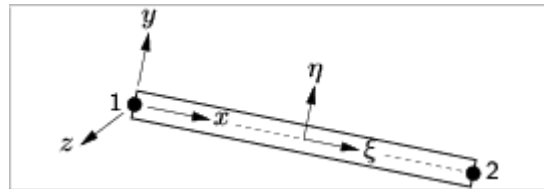
Columna	Carga axial, P (kg)	P/P <sub>cr</sub>	P/P <sub>y</sub>	Longitud (cm)
T40C5Y5	250000	0.5	0.5	706
T40C5Y3	149500	0.5	0.3	910
T40C5Y1	49600	0.5	0.1	1580
T40C3Y5	250000	0.3	0.5	545
T40C3Y3	149500	0.3	0.3	706
T40C3Y1	49600	0.3	0.1	1225
T40C1Y5	250000	0.1	0.5	316
T40C1Y3	149500	0.1	0.3	410
T40C1Y1	49600	0.1	0.1	706
T40C0Y0L316	0	0	0	316
T40C0Y0L410	0	0	0	410
T40C0Y0L545	0	0	0	545
T40C0Y0L706	0	0	0	706
T40C0Y0L910	0	0	0	910
T40C0Y0L1225	0	0	0	1225
T40C0Y0L1580	0	0	0	1580

*Características de la columna de sección cajón T40.*

### 3.3 ANÁLISIS

Se utilizó el programa de elemento finito DIANA 9.1 (TNO, 2005) para modelar las columnas discretizándolas convenientemente, tanto en longitud como en la sección transversal, para asegurar la consideración adecuada de las no linealidades tanto geométricas como del material, el cual se consideró con una relación constitutiva esfuerzo-deformación elastoplástica perfecta en esta etapa del estudio.

Se utilizó el elemento viga L7BEN de la figura 4, que es un elemento clase II, que se caracteriza por plantear la hipótesis de secciones planas y de ignorar los efectos de cortante. Se utilizaron procesos de incremento paulatino de desplazamiento para obtener, en diversas etapas del mismo, los valores de cortantes, desplazamientos y curvaturas de las secciones transversales en diferentes puntos de la columna.



*Figura 4. Elemento L7BEN - recto, 2 nodos, 2-D.*

Class Theory Type	Class-I <i>Bernoulli</i>		Class-II <i>Bernoulli</i>		Class-III <i>Mindlin-Reissner</i>						
	L6BEN	L12BE	L7BEN	L13BE	CL9BE	CL12B	CL15B	CL18B	CL24B	CL30B	
Dimension	2D	3D	2D	3D	2D	2D	2D	3D	3D	3D	
Straight/Curved	str.	str.	str.	str.	cur.	cur.	cur.	cur.	cur.	cur.	
Nr. of nodes	2	2	2	2	3	4	5	3	4	5	
Nr. of d.o.f.	6	12	7	13	9	12	15	18	24	30	
Variables <sup>1</sup>	$u_x$	1	1	2	2	2	3	3	2	3	4
	$u_y$	3	3	3	3	2	3	3	2	3	4
	$u_z$		3		3				2	3	4
	$\phi_x$		×		×				2	3	4
	$\phi_y$		×		×				2	3	4
	$\phi_z$	×	×	×	×	2	3	3	2	3	4
	$\Delta u_x$			×	×						
Primary strains	$\Delta u$	$\kappa$	$\Delta u$	$\Delta \phi$	$\kappa$	$\varepsilon$	$\gamma$	$\varepsilon$	$\gamma$	$\varepsilon$	$\gamma$
Primary stresses	$N$	$M$	$Q$	$N$	$M$	$Q$	$\sigma$	$\sigma$	$\sigma$	$\sigma$	$\sigma$
Shear deformation	option <sup>2</sup>	option	no	no	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Numerically integrated cross-section	no	no	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Numerically integrated along beam axis	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes

Table 4.1: OVERVIEW OF BEAM ELEMENTS

<sup>1</sup> Numbers 1–4 for interpolation order, × for 'derived'.

<sup>2</sup> Optionally, the L6BEN element includes the effects of shear deformation according to the *Timoshenko* theory.

Figura 5. Características de los elementos viga.

### 3.4 RESULTADOS

Se obtuvieron graficas cortante,  $V$ , contra desplazamiento lateral  $\delta$ , las cuales se normalizaron respectivamente con respecto el cortante plástico,  $V_p$  (definido como el momento plástico  $M_p$  entre la longitud  $L$  de la columna), y con respecto al desplazamiento de fluencia,  $dy^*$ , definido aquí como el desplazamiento asociado a la intersección de dos rectas, una con la pendiente de la parte lineal y la segunda con pendiente nula asociada a la plasticidad total, de la columna sin carga axial, como se muestra en la figura 6.

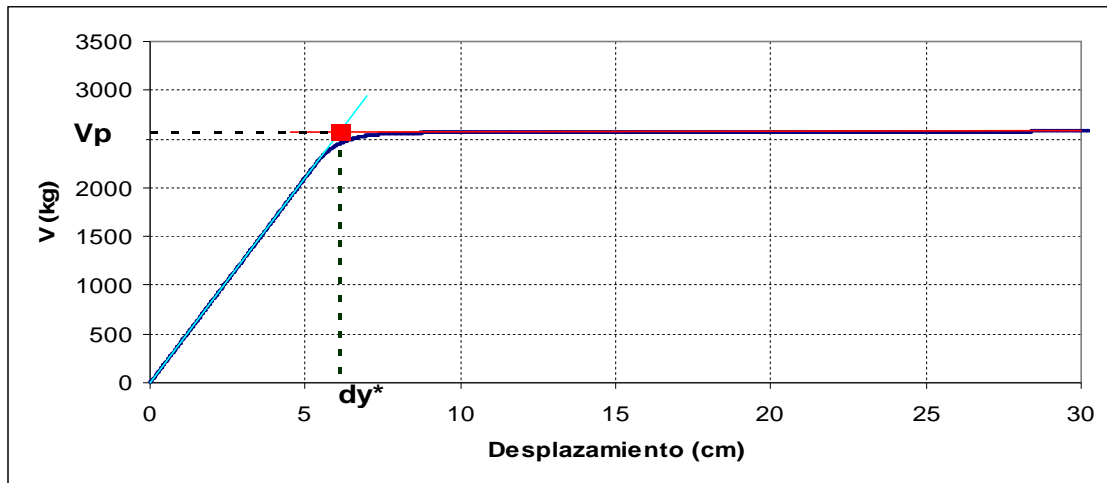


Figura 6. Grafica cortante vs desplazamiento lateral.

### Capítulo 3. Análisis de columnas ante carga monótona

A continuación se muestran las gráficas Cortante-desplazamiento, normalizadas, como puede apreciarse en los tres casos se obtuvieron curvas similares, fundamentalmente debido a la normalización utilizada. Se ratifica en estas gráficas la conocida influencia de la carga axial tanto en la degradación de resistencia, como en la de rigidez (Bruneau y otros, 1998, Bernal, 1992).

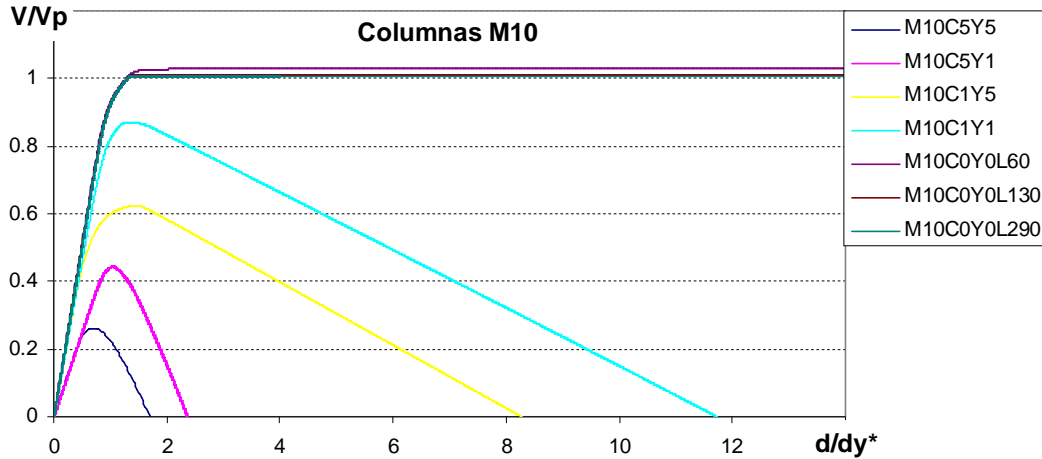


Figura 7. Cortante normalizado vs. desplazamiento normalizado, columnas M10.

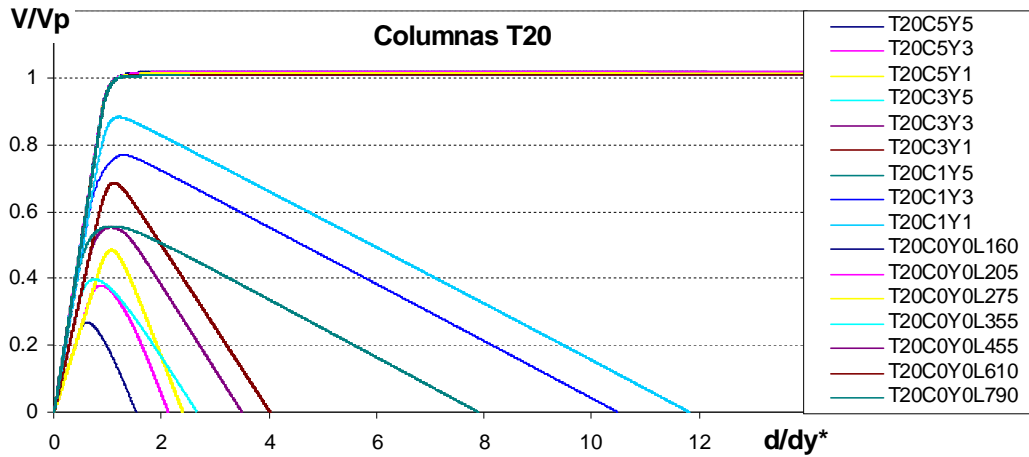


Figura 8. Cortante normalizado vs. desplazamiento normalizado, columnas T20.

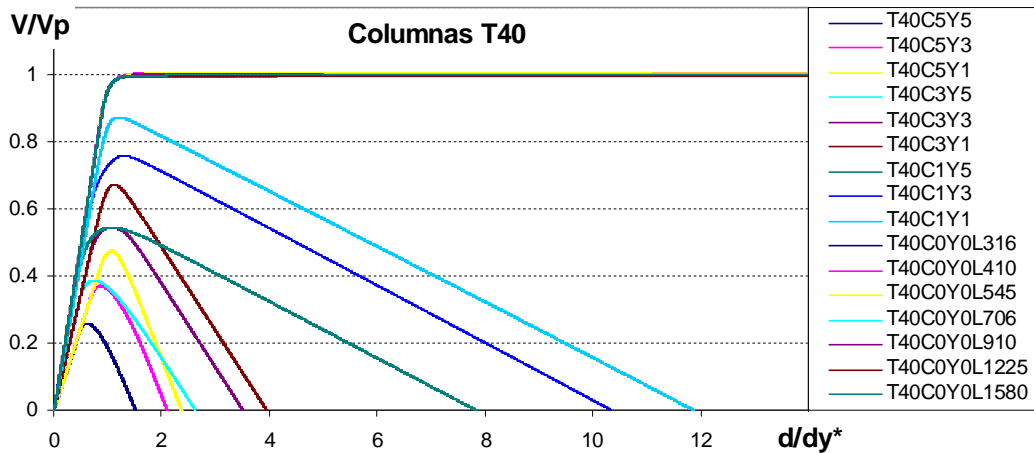
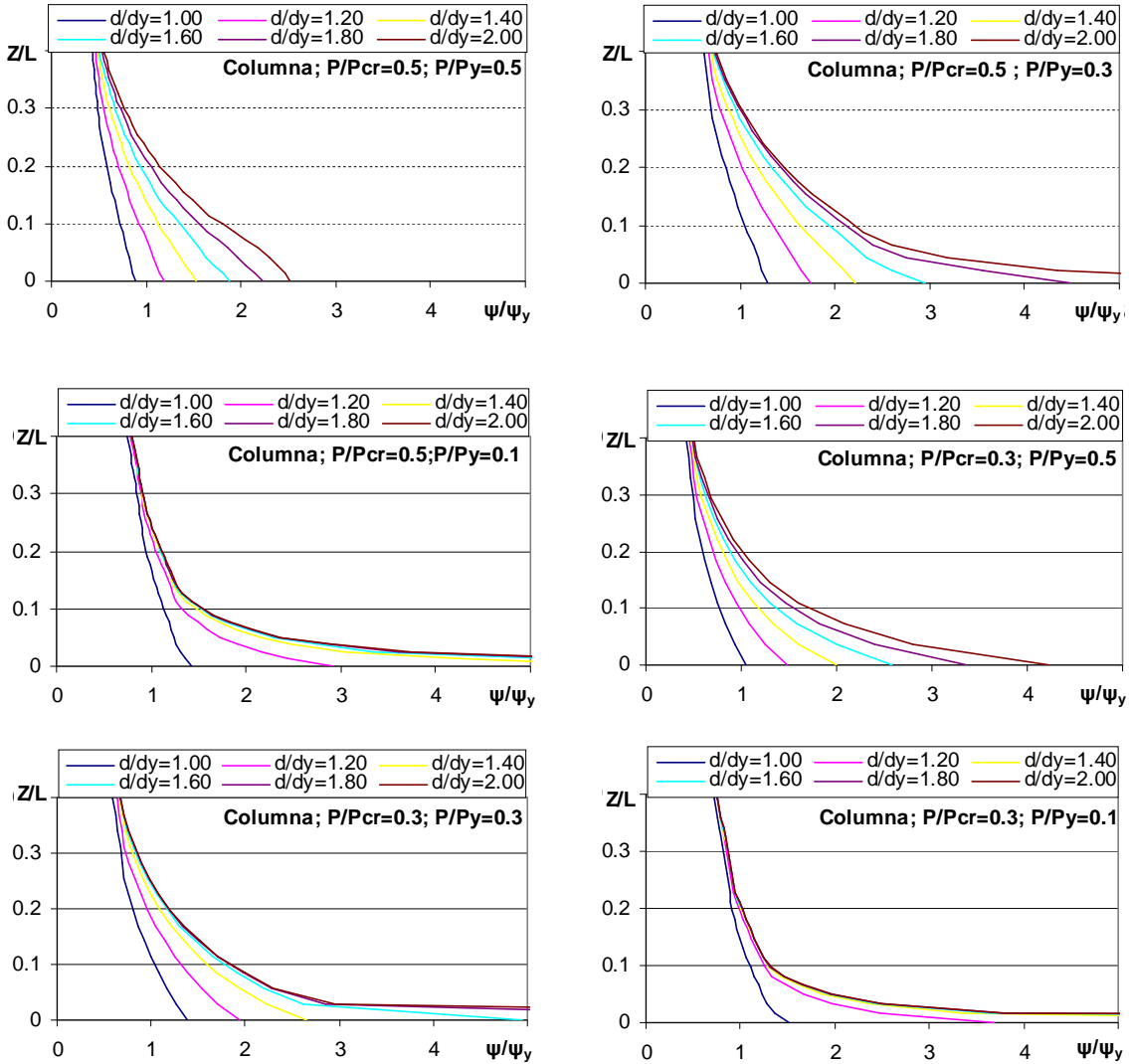


Figura 9. Cortante normalizado vs. desplazamiento normalizado, columnas T40.

### 3.4.1 Curvaturas

En la figura siguiente se muestran los valores de las curvaturas para diferentes ubicaciones de las columnas. Únicamente se ilustran los resultados para la sección T40, dada la similitud de dichas gráficas para las otras secciones. En particular, las curvaturas se muestran normalizadas a la curvatura de fluencia sin carga axial de la sección ( $\psi_y$ ). La ubicación se representa por la distancia al empotramiento ( $z$ ) normalizada a la longitud de la columna ( $L$ ). Se muestran las curvas para diferentes grados de desplazamiento del extremo libre de la columna ( $d$ ) normalizado a su desplazamiento de fluencia ( $d_y$ ) correspondiente a una idealización elastoplástica bilineal que ya considera el efecto de la carga axial.





### Capítulo 3. Análisis de columnas ante carga monótona

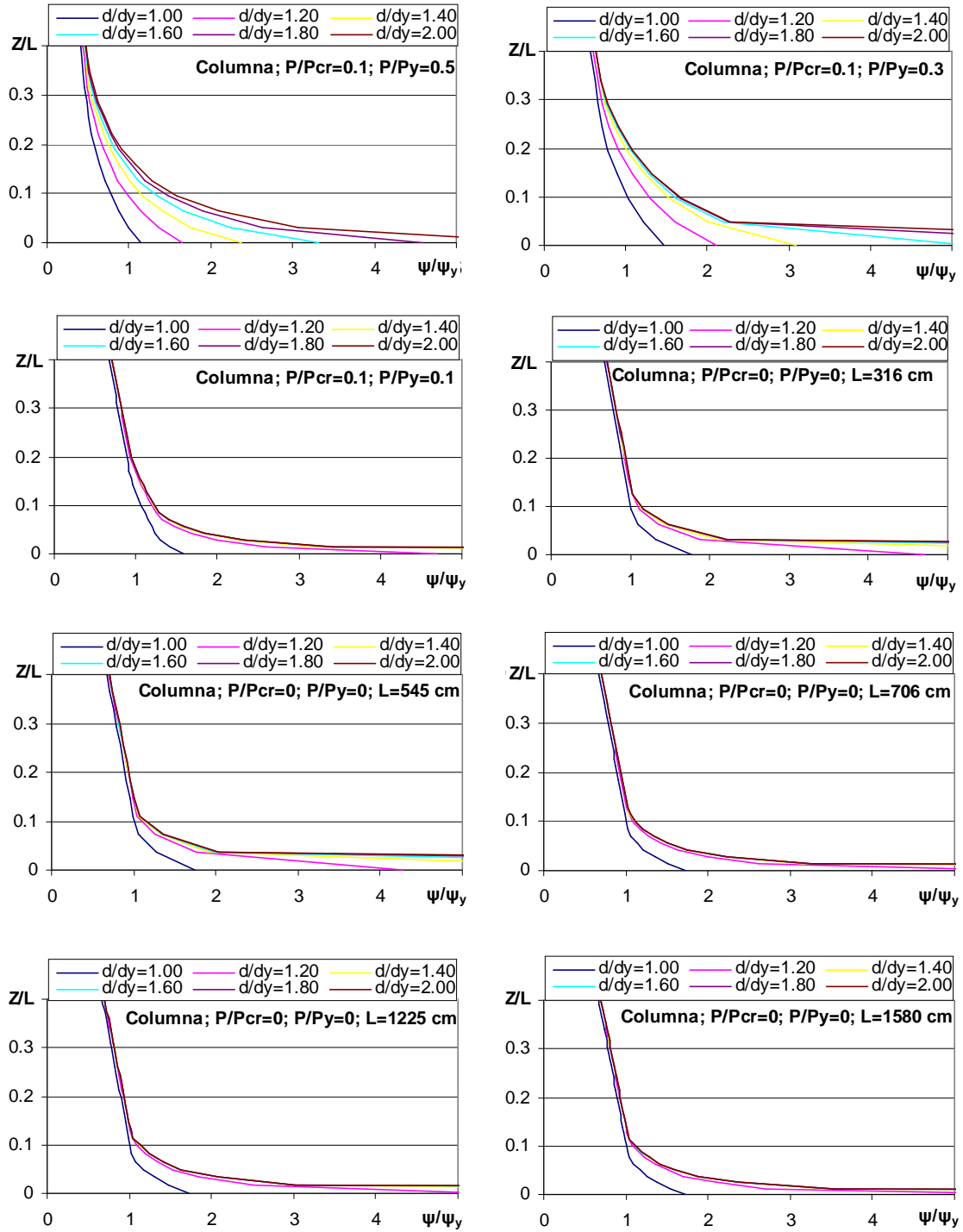


Figura 10. Valores de las curvaturas para diferentes ductilidades de las columnas T40.

De las gráficas anteriores se observa que, al aumentar la ductilidad ( $d/dy$ ), se incrementan dramáticamente las curvaturas en las cercanías del empotramiento. Sin embargo, para las columnas con un nivel de carga axial elevado en relación a la carga de fluencia, estas curvaturas parecen acotarse a valores finitos. Este comportamiento se relaciona con la mayor amplitud en las curvaturas que desarrollan fluencia a lo largo de la columna, debido a la carga axial existente.

### 3.4.2 Curvaturas y ductilidad

La figura 11 muestra, agrupadas en gráficas asociadas a la misma ductilidad del extremo de la columna, las distribuciones de curvaturas para los diferentes niveles de carga axial utilizados en cada sección.

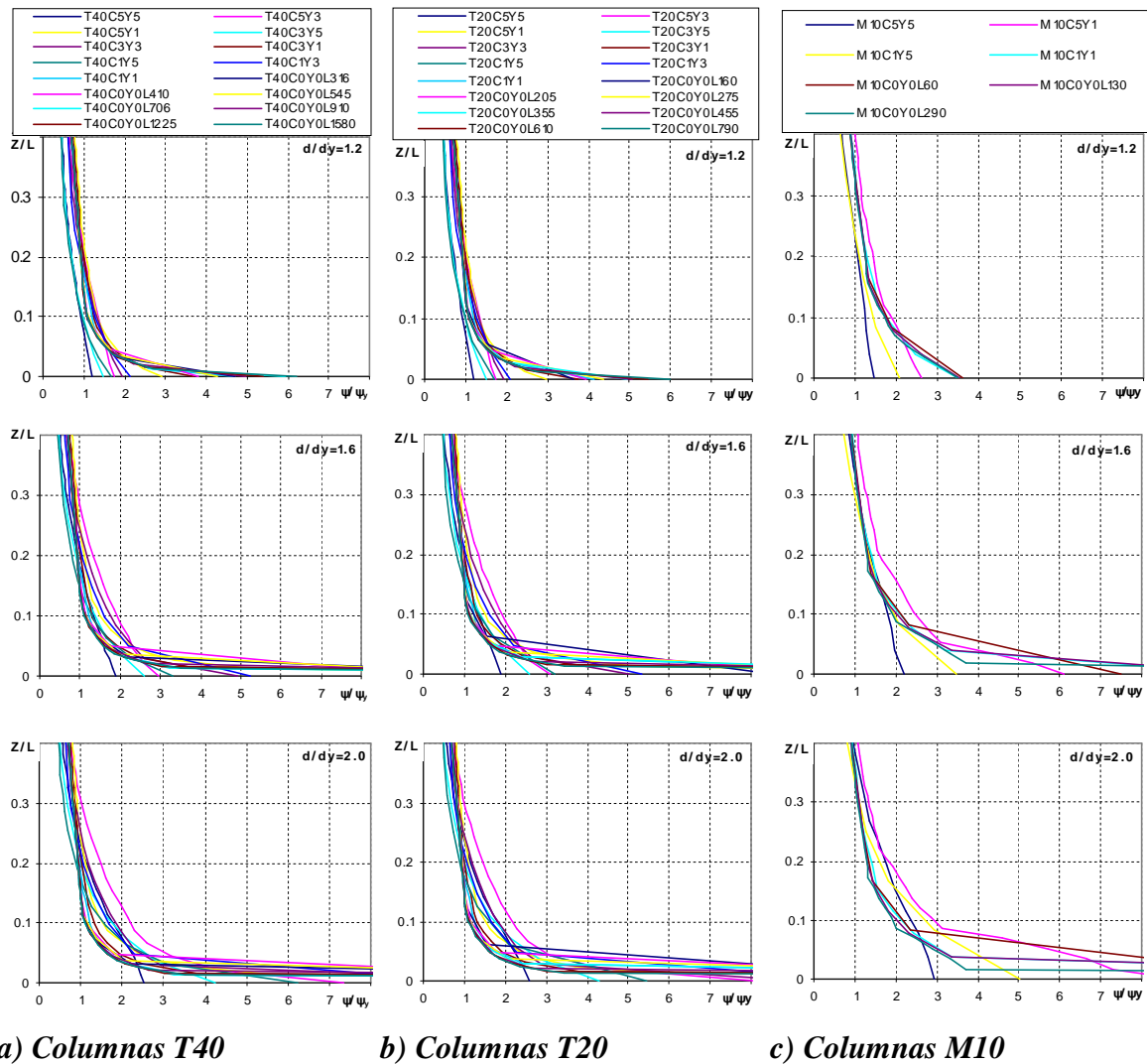


Figura 11. Gráficas comparativas de las curvaturas para ductilidades específicas de desplazamiento.

### Capítulo 3. Análisis de columnas ante carga monótona

Se vuelve a observar en estas gráficas las menores curvaturas para los casos donde la carga axial es elevada en relación a la de fluencia. Es de resaltar que esta observación es más notoria para niveles de ductilidad bajos de la columna, y que, con la normalización señalada, las gráficas no parecen depender sustancialmente del tipo de sección estudiado. La diferencia fundamental radica en la extensión desde el empotramiento donde se desarrollan las plasticidades.

#### 3.4.3 Longitud de plasticidad

Es el tramo de la columna en el cual se presenta algún grado de plastificación en la sección transversal, en la siguiente tabla de las columnas con sección maciza se observa una diferencia casi del doble entre las longitudes de plasticidad en columnas con y sin carga axial.

Columna	Lp/L					
	d/dy=1.0	d/dy=1.2	d/dy=1.4	d/dy=1.6	d/dy=1.8	d/dy=2.0
<b>M10C5Y5</b>	0.50	0.55	0.59	0.61	0.62	0.63
<b>M10C5Y1</b>	0.42	0.46	0.48	0.49	0.50	0.50
<b>M10C1Y5</b>	0.49	0.52	0.55	0.56	0.58	0.58
<b>M10C1Y1</b>	0.36	0.40	0.41	0.42	0.42	0.42
<b>M10C0Y0L60</b>	0.29	0.33	0.35	0.35	0.35	0.35
<b>M10C0Y0L130</b>	0.28	0.32	0.34	0.34	0.34	0.34
<b>M10C0Y0L290</b>	0.28	0.32	0.34	0.34	0.34	0.34

*Valores de Lp/L para diferentes ductilidades de las columnas M10.*

En las columnas de sección cajón, podemos ver que existe una diferencia aproximadamente del triple en la longitud de plasticidad en las columnas con y sin carga axial.

Columna	Lp/L					
	d/dy=1.0	d/dy=1.2	d/dy=1.4	d/dy=1.6	d/dy=1.8	d/dy=2.0
<b>T20C5Y5</b>	0.29	0.35	0.39	0.41	0.43	0.44
<b>T20C5Y3</b>	0.30	0.36	0.39	0.41	0.42	0.43
<b>T20C5Y1</b>	0.24	0.29	0.30	0.30	0.31	0.31
<b>T20C3Y5</b>	0.29	0.34	0.37	0.39	0.40	0.41
<b>T20C3Y3</b>	0.27	0.33	0.36	0.37	0.38	0.38
<b>T20C3Y1</b>	0.21	0.25	0.26	0.26	0.26	0.26
<b>T20C1Y5</b>	0.27	0.31	0.34	0.36	0.37	0.37
<b>T20C1Y3</b>	0.25	0.30	0.33	0.34	0.34	0.34
<b>T20C1Y1</b>	0.17	0.22	0.23	0.23	0.23	0.23
<b>T20C0Y0L160</b>	0.11	0.14	0.15	0.15	0.16	0.16
<b>T20C0Y0L205</b>	0.11	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15
<b>T20C0Y0L275</b>	0.11	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15

### Capítulo 3. Análisis de columnas ante carga monótona

<b>T20C0Y0L355</b>	0.11	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15
<b>T20C0Y0L455</b>	0.11	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15
<b>T20C0Y0L610</b>	0.10	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
<b>T20C0Y0L790</b>	0.10	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14

*Valores de  $L_p/L$  para diferentes ductilidades de las columnas T20.*

Columna	Lp/L					
	d/dy=1.0	d/dy=1.2	d/dy=1.4	d/dy=1.6	d/dy=1.8	d/dy=2.0
<b>T40C5Y5</b>	0.30	0.36	0.39	0.42	0.43	0.45
<b>T40C5Y3</b>	0.29	0.35	0.40	0.42	0.42	0.42
<b>T40C5Y1</b>	0.24	0.29	0.30	0.31	0.31	0.31
<b>T40C3Y5</b>	0.26	0.33	0.37	0.37	0.37	0.40
<b>T40C3Y3</b>	0.25	0.31	0.34	0.37	0.37	0.37
<b>T40C3Y1</b>	0.21	0.24	0.26	0.26	0.26	0.26
<b>T40C1Y5</b>	0.27	0.31	0.34	0.35	0.37	0.37
<b>T40C1Y3</b>	0.24	0.29	0.29	0.29	0.34	0.34
<b>T40C1Y1</b>	0.19	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
<b>T40C0Y0L316</b>	0.11	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15
<b>T40C0Y0L410</b>	0.11	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15
<b>T40C0Y0L545</b>	0.11	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15
<b>T40C0Y0L706</b>	0.10	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
<b>T40C0Y0L910</b>	0.11	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15
<b>T40C0Y0L1225</b>	0.11	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
<b>T40C0Y0L1580</b>	0.11	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14

*Valores de  $L_p/L$  para diferentes ductilidades de las columnas T40.*

En la figura 12 se muestran las longitudes de columna asociadas al desarrollo de algún tipo de plasticidad en la sección transversal, para diferentes secciones, diferentes condiciones de carga y diferentes valores de ductilidad de desplazamiento. En esta figura, resalta el hecho de que la longitud de plasticidad tiende a permanecer constante a ductilidades elevadas en todos los casos.

### Capítulo 3. Análisis de columnas ante carga monótona

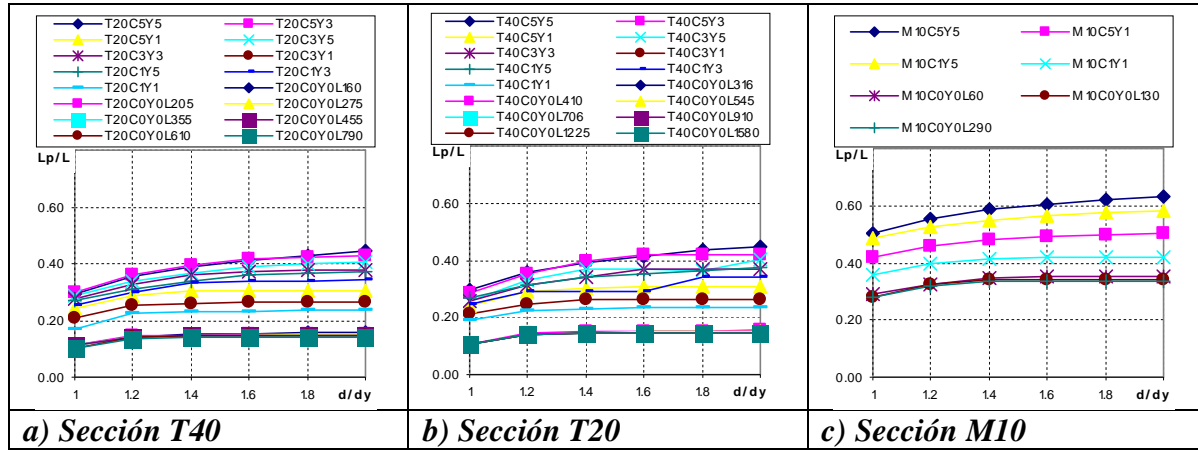


Figura 12. Longitudes de desarrollo de plasticidad para las columnas estudiadas.

**Capítulo 4. Análisis de columnas ante carga cíclica**  
**4. ANÁLISIS DE COLUMNAS ANTE CARGA CÍCLICA.**

En este capítulo se analiza la distribución de plasticidades en columnas sometidas la acción de carga transversal incremental y cíclica. Se considera un intervalo amplio de cargas axiales compresivas y de relaciones de esbeltez. Para ello, se realizan simulaciones de elemento finito considerando las no linealidades geométricas y constitutivas asociadas al estudio. A continuación se describe la metodología utilizada para la realización del estudio, así como los resultados obtenidos.

#### **4.1 METODOLOGÍA**

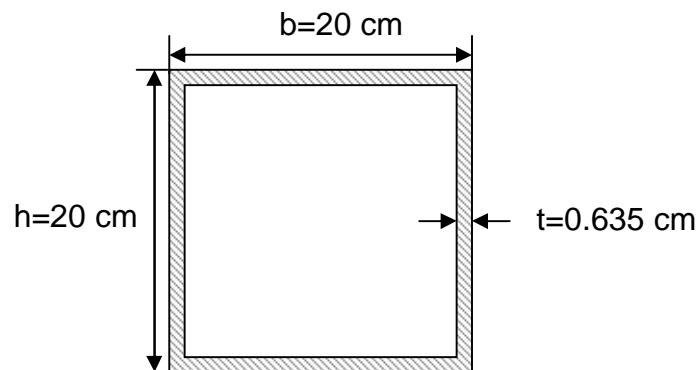
Se establecieron los parámetros que definen las características de las secciones transversales a considerar de forma que fueran secciones compactas. Después se consideraron diferentes longitudes de columna de forma que se obtuvieran diferentes relaciones de la carga axial con la carga de fluencia  $P_y$  y la carga crítica de pandeo  $P_{cr}$ . Las columnas definidas se representaron mediante un modelo de elemento finito, en el cual se proporcione la carga lateral mediante un control de desplazamientos. Finalmente se obtuvieron relaciones de la curvatura promedio con la longitud de la columna. En forma paralela se registró la dimensión del tramo con plasticidad del material y se obtuvieron graficas comparativas del cortante aplicado contra el desplazamiento

#### **4.2 MODELOS**

##### **4.2.1 Columnas sección cajón**

Se estudiaron dos secciones cajón cuadradas, con un ancho  $b$ , altura  $h$ , espesor  $t$ , área  $A=2ht+2*(h-2t)t$  y momento de inercia  $I=2*(ht/12+ht*(h/2-t/2)) + 2*(t*(h-2t)^3/12)$ . La longitud de la columna depende de las relaciones de carga axial con la carga de fluencia  $P_y$  y la carga crítica de pandeo  $P_{cr}$ . El material que se utilizó es elastoplástico, el cual tiene las mismas propiedades que el de la sección maciza.

Para las dos secciones cajón, el momento plástico se cálculo de acuerdo a la teoría de mecánica de materiales. La primera sección cajón mostrada en la figura 2 tiene un ancho  $b=20$  cm, altura  $h=20$  cm, espesor  $t=0.635$  cm, denominada T20, y la segunda sección de la figura 3 tiene un ancho  $b=40$  cm, altura  $h=40$  cm, espesor  $t=0.635$  cm, denominada T40.

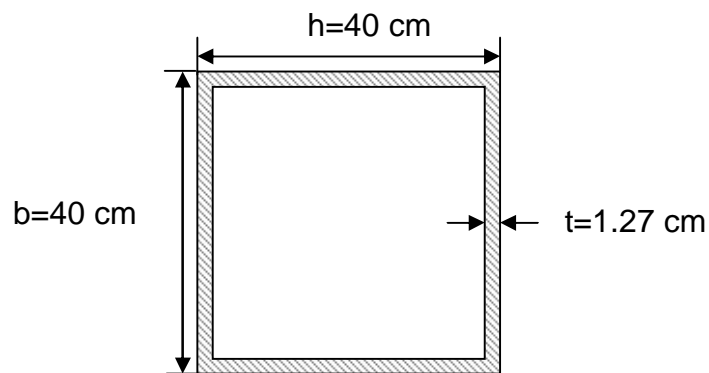


*Figura 2. Sección cajón, T20.*

#### Capítulo 4. Análisis de columnas ante carga cíclica

Columna	Carga axial, P (kg)	P/P <sub>cr</sub>	P/P <sub>y</sub>	Longitud (cm)
T20C5Y5	62000	0.5	0.5	355
T20C5Y3	37300	0.5	0.3	455
T20C5Y1	12400	0.5	0.1	790
T20C3Y5	62000	0.3	0.5	275
T20C3Y3	37300	0.3	0.3	355
T20C3Y1	12400	0.3	0.1	610
T20C1Y5	62000	0.1	0.5	160
T20C1Y3	37300	0.1	0.3	205
T20C1Y1	12400	0.1	0.1	355
T20C0Y0L160	0	0	0	160
T20C0Y0L205	0	0	0	205
T20C0Y0L275	0	0	0	275
T20C0Y0L355	0	0	0	355
T20C0Y0L455	0	0	0	455
T20C0Y0L610	0	0	0	610
T20C0Y0L790	0	0	0	790

*Características de la columna de sección cajón T20.*



*Figura 3. Sección cajón, T40.*

Columna	Carga axial, P (kg)	P/P <sub>cr</sub>	P/P <sub>y</sub>	Longitud (cm)
T40C5Y5	250000	0.5	0.5	706
T40C5Y3	149500	0.5	0.3	910
T40C5Y1	49600	0.5	0.1	1580
T40C3Y5	250000	0.3	0.5	545
T40C3Y3	149500	0.3	0.3	706
T40C3Y1	49600	0.3	0.1	1225
T40C1Y5	250000	0.1	0.5	316
T40C1Y3	149500	0.1	0.3	410
T40C1Y1	49600	0.1	0.1	706
T40C0Y0L316	0	0	0	316
T40C0Y0L410	0	0	0	410
T40C0Y0L545	0	0	0	545
T40C0Y0L706	0	0	0	706
T40C0Y0L910	0	0	0	910
T40C0Y0L1225	0	0	0	1225
T40C0Y0L1580	0	0	0	1580

*Características de la columna de sección cajón T40.*

### 4.3 ANÁLISIS

Se utilizó el programa de elemento finito DIANA 9.1 (TNO, 2005) para modelar las columnas discretizándolas convenientemente, tanto en longitud como en la sección transversal, para asegurar la consideración adecuada de las no linealidades tanto geométricas como del material, el cual se consideró con una relación constitutiva esfuerzo-deformación elastoplástica perfecta en esta etapa del estudio.

Se utilizó el elemento viga L7BEN, que es un elemento clase II, que se caracteriza por plantear la hipótesis de secciones planas y de ignorar los efectos de cortante. Se utilizaron procesos de incremento paulatino de desplazamiento para obtener, en diversas etapas del mismo, los valores de cortantes, desplazamientos y curvaturas de las secciones transversales en diferentes puntos de la columna.

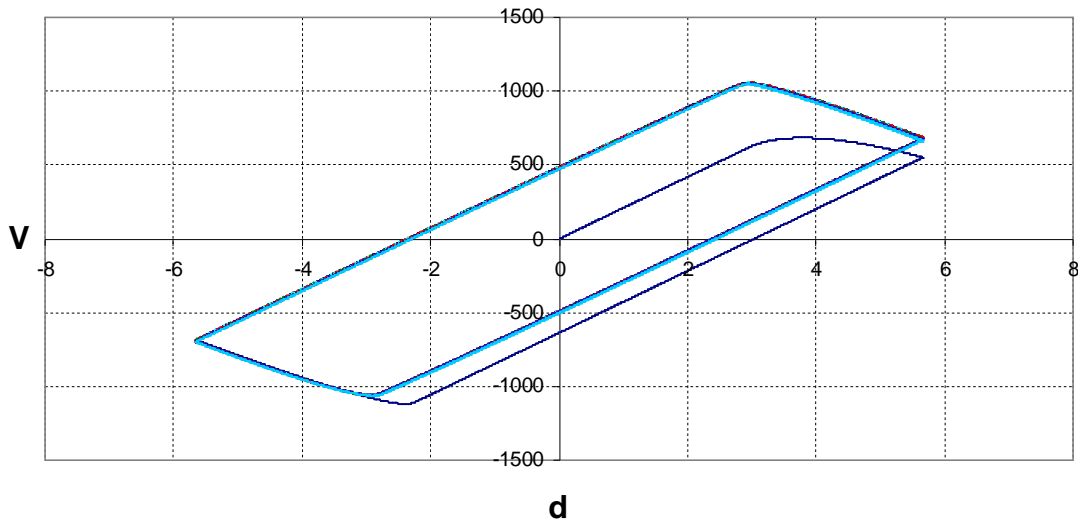
Se realizaron tres diferentes tipos de análisis para las columnas sometidas a la acción de carga transversal incremental y cíclica. En el primero se realizó el análisis incremental controlando el desplazamiento hasta una relación de 1.4 veces el desplazamiento lateral,  $d$ , normalizado con respecto al desplazamiento de fluencia,  $d_y$ , en el segundo análisis se llevó a cabo controlando el desplazamiento hasta una relación de 2 veces respecto al desplazamiento de fluencia y finalmente en el tercer análisis se controló el desplazamiento hasta llegar a 5 veces la deformación unitaria de fluencia  $\epsilon_y$ .



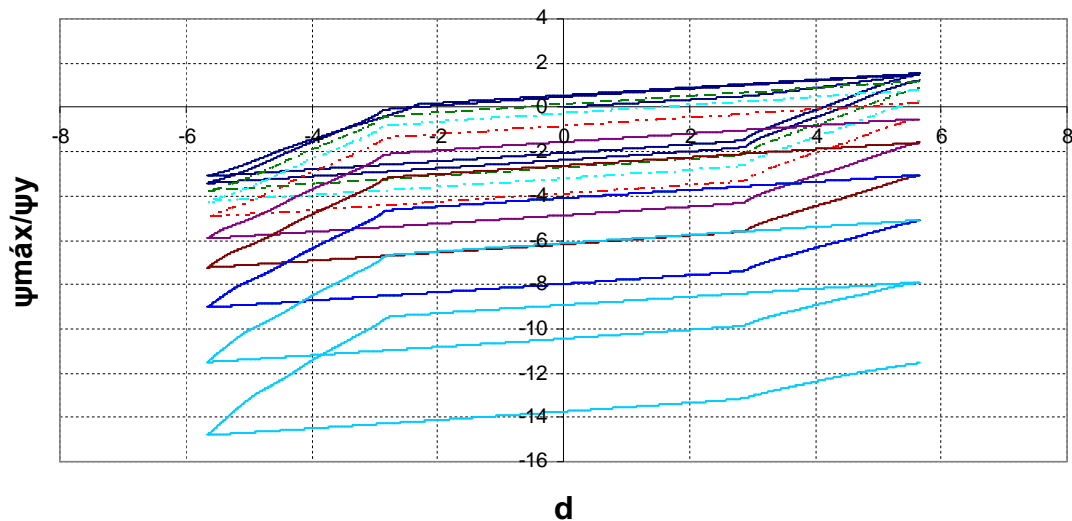
#### 4.3.1 Columnas T20 y T40, $d/d_y=1.4$

La carga cíclica que se utilizó para este análisis fue mediante un control de desplazamiento, el cual se llevó a cabo hasta una relación de 1.4 veces el desplazamiento lateral,  $d$  normalizado con respecto al desplazamiento de fluencia,  $d_y$ . De dichos análisis se obtuvieron graficas cortante,  $V$ , contra desplazamiento lateral  $d$ ; graficas de curvatura máxima,  $\Psi$ , normalizada con la curvatura de fluencia,  $\Psi_y$  y contra desplazamiento lateral  $d$ ; y graficas de longitud plástica  $L_p/L$ , contra el desplazamiento lateral normalizado con respecto al desplazamiento de fluencia,  $d_y^*$ , definido aquí como el desplazamiento asociado a la intersección de dos rectas, una con la pendiente de la parte lineal y la segunda con pendiente nula asociada a la plasticidad total. Se puede observar que el comportamiento en los ciclos de dichas columnas es muy estable debido a que la relación de  $d/d_y$  es pequeña y por lo tanto el elemento no alcanza a plastificarse totalmente.

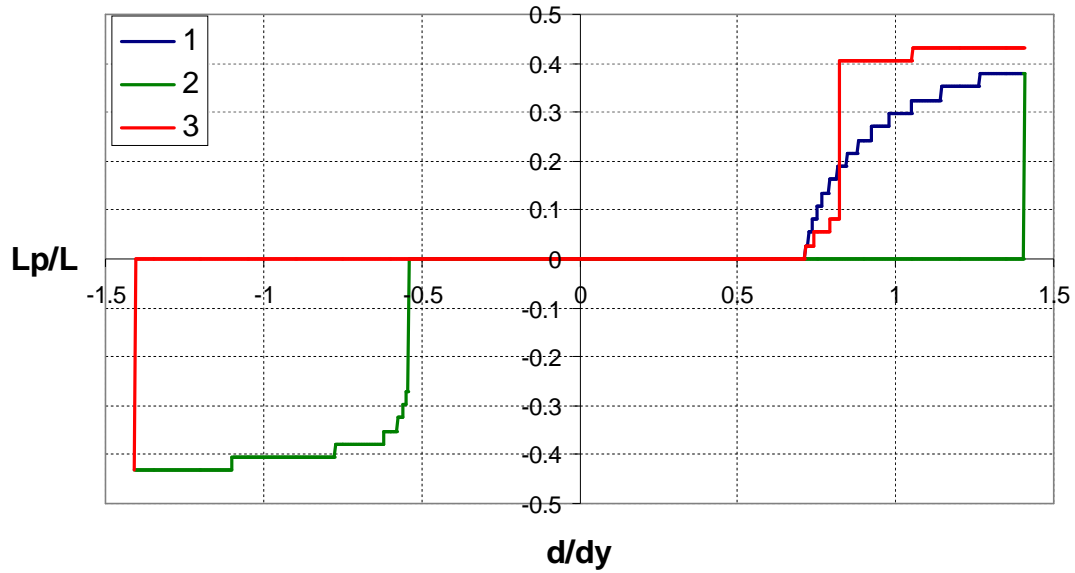
**T20C5Y5**



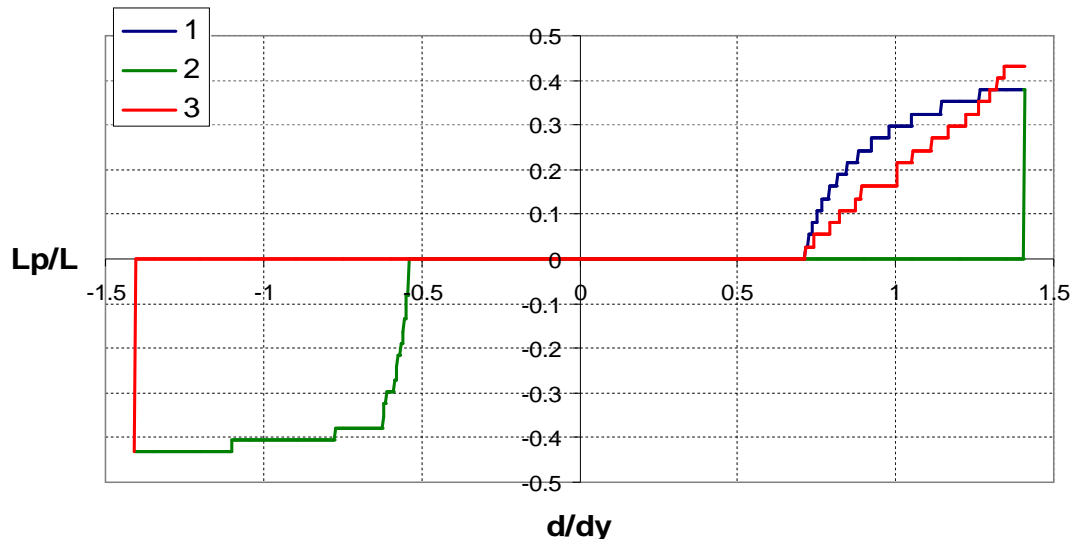
**T20C5Y5**



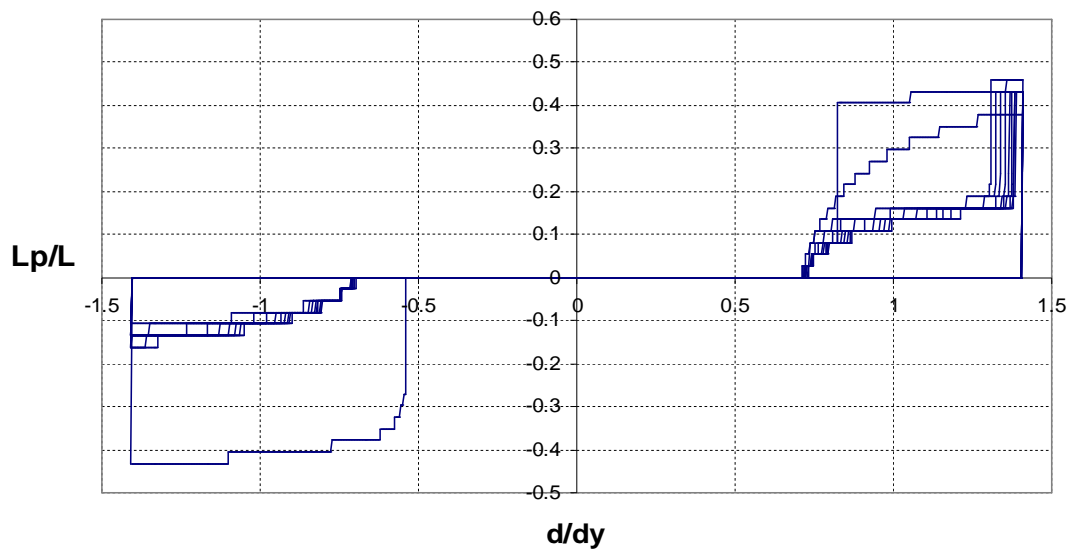
### T20C5Y5 (Lp1)



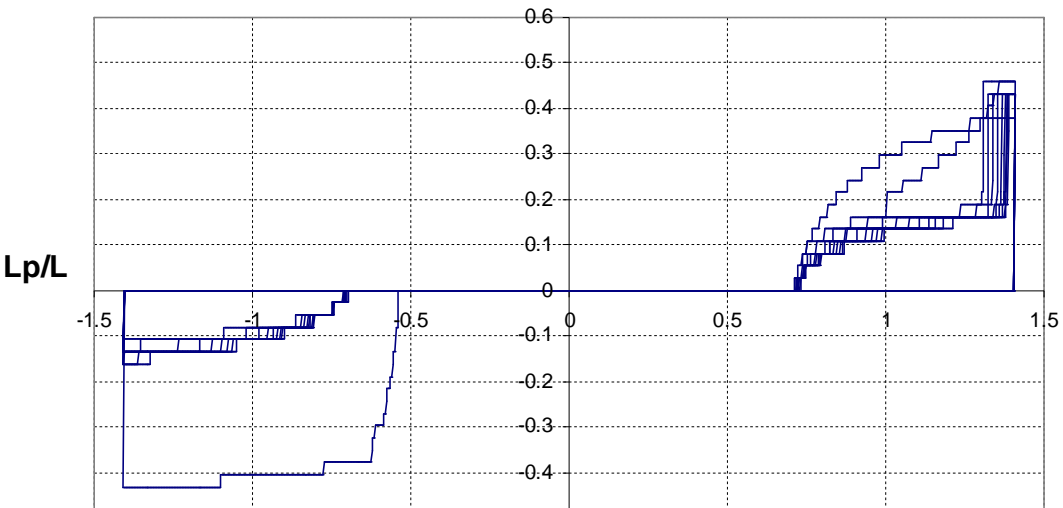
### T20C5Y5 (Lp2)



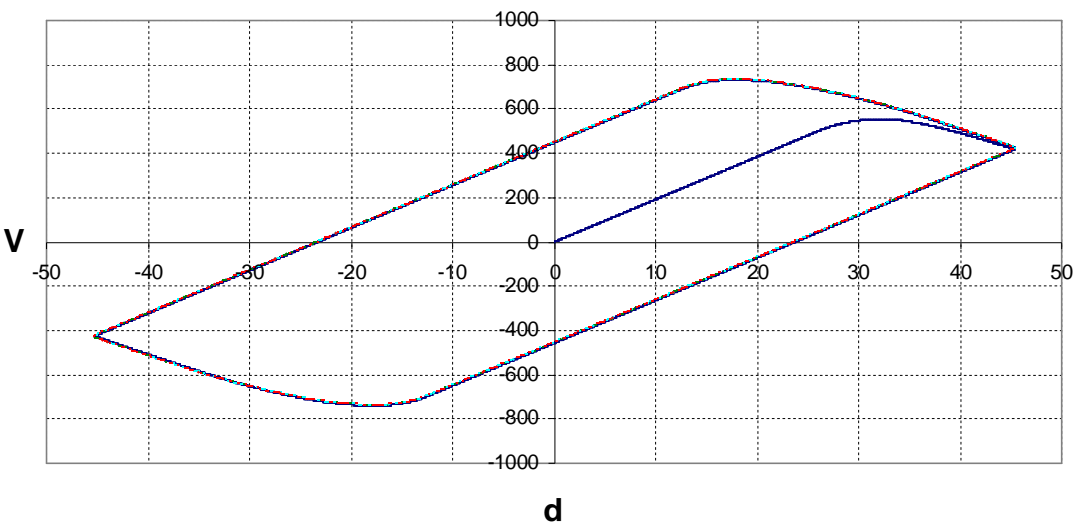
### T20C5Y5 (Lp1)



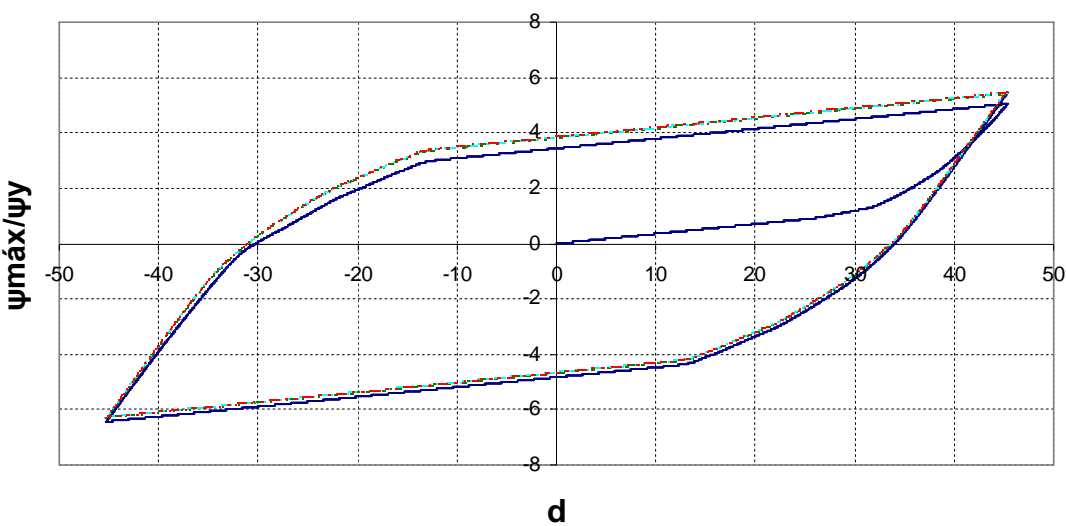
T20C5Y5 (Lp2)



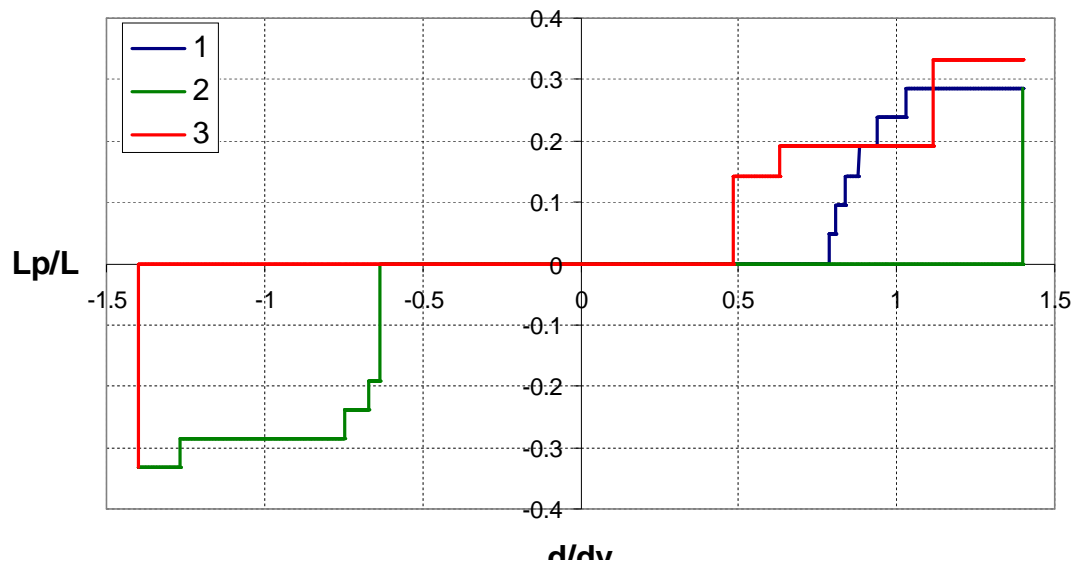
T20C5Y1



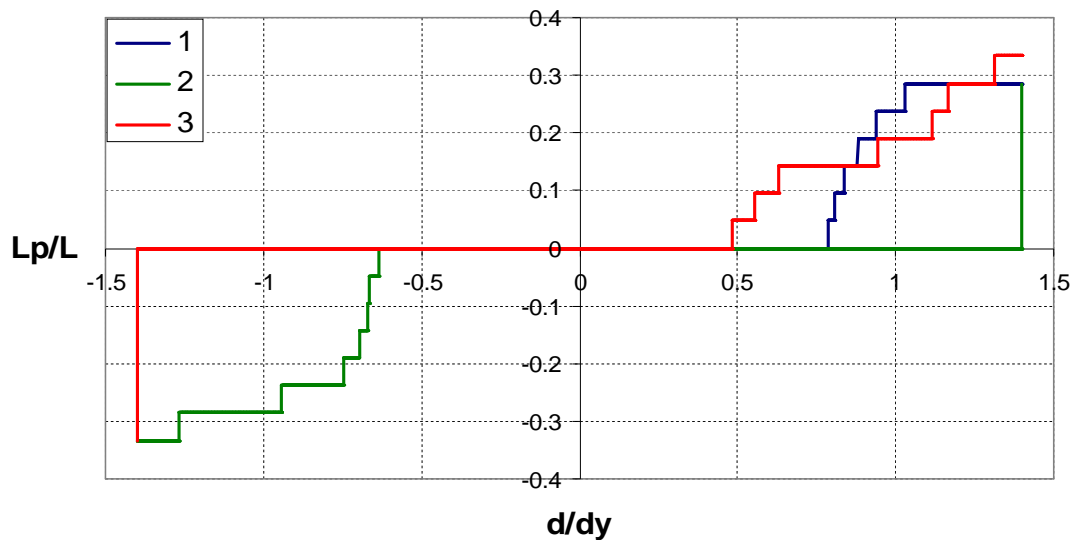
T20C5Y1



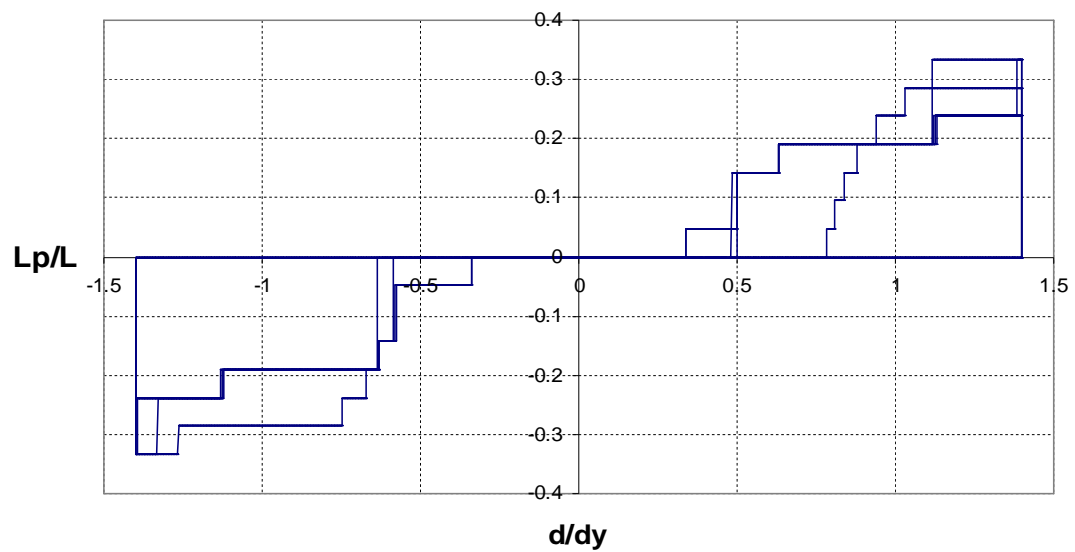
### T20C5Y1 (Lp1)



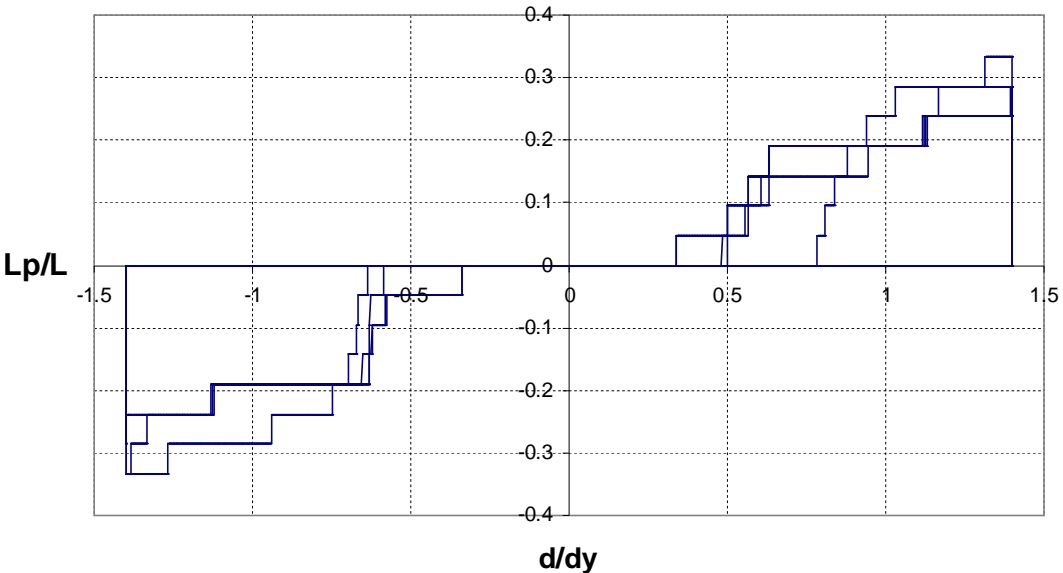
### T20C5Y1 (Lp2)



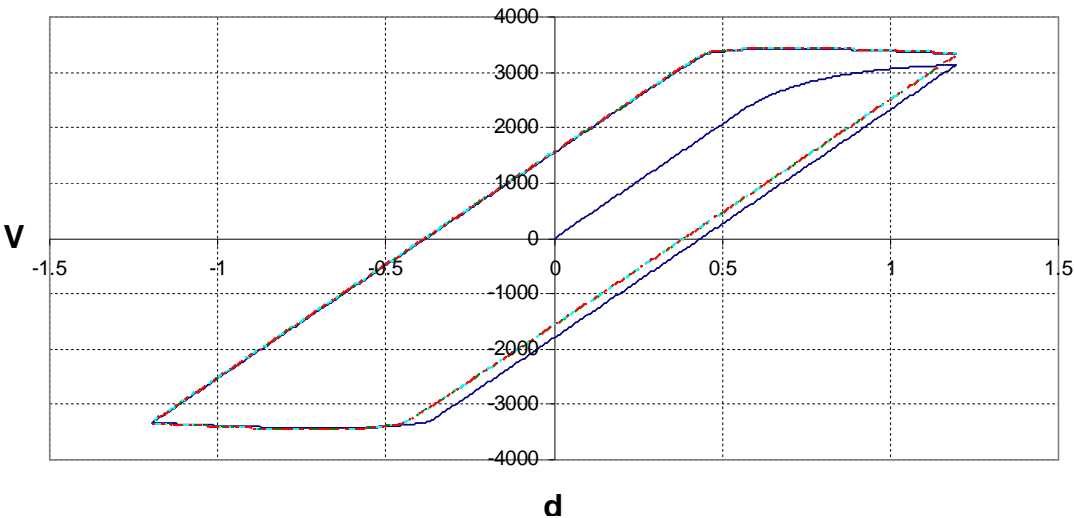
### T20C5Y1 (Lp1)



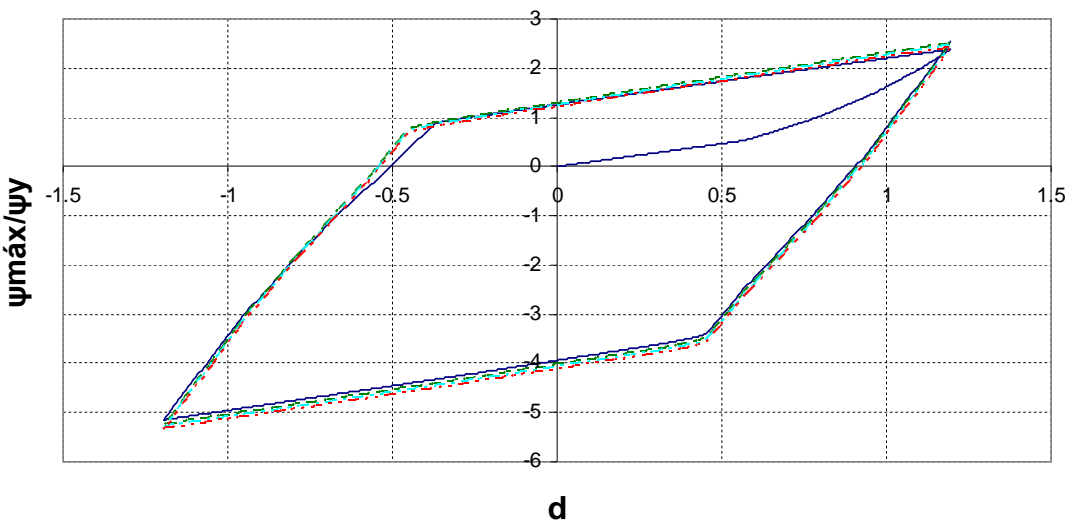
T20C5Y1 (Lp2)



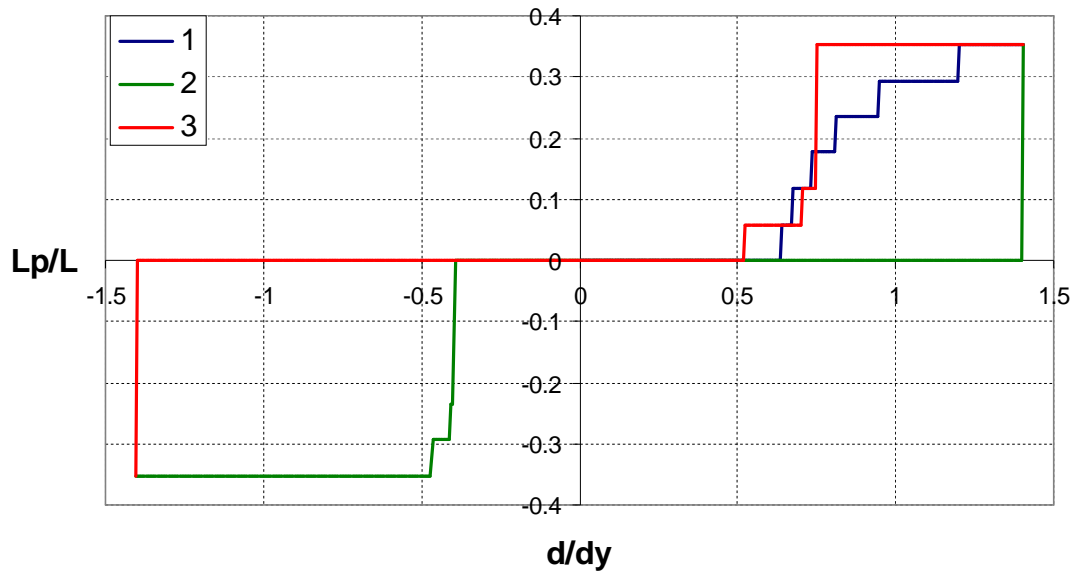
T20C1Y5



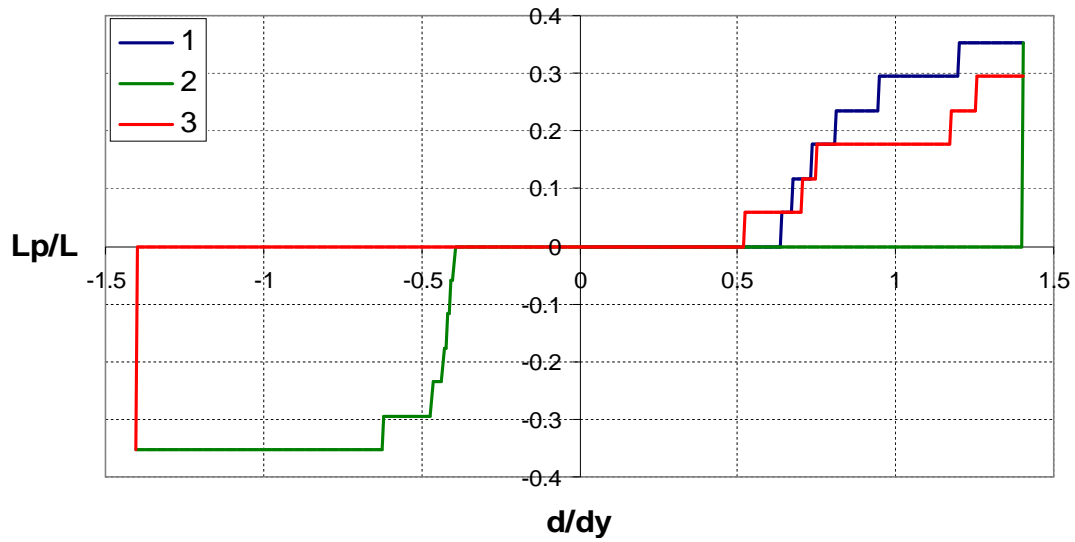
T20C1Y5



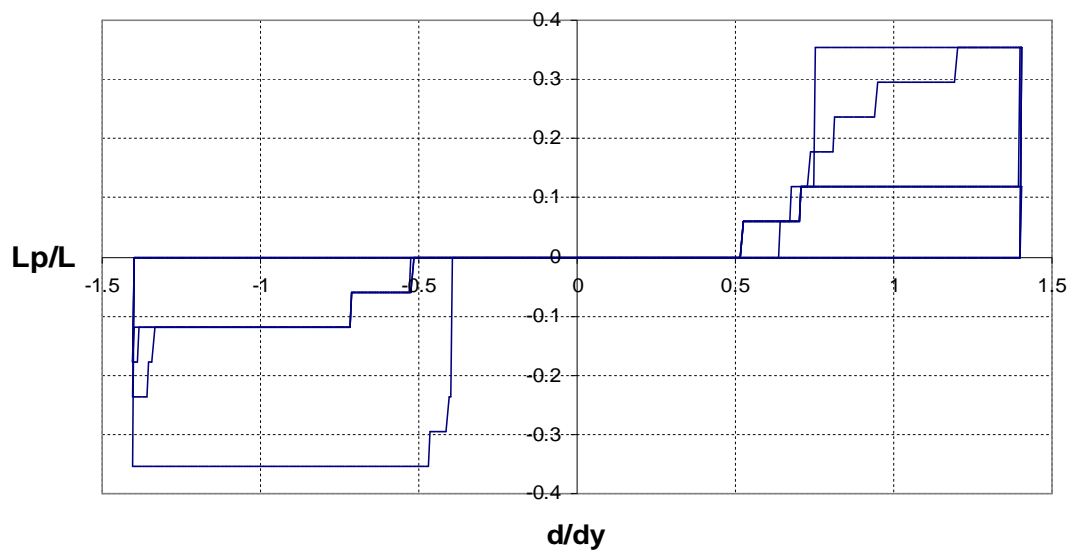
### T20C1Y5 (Lp1)



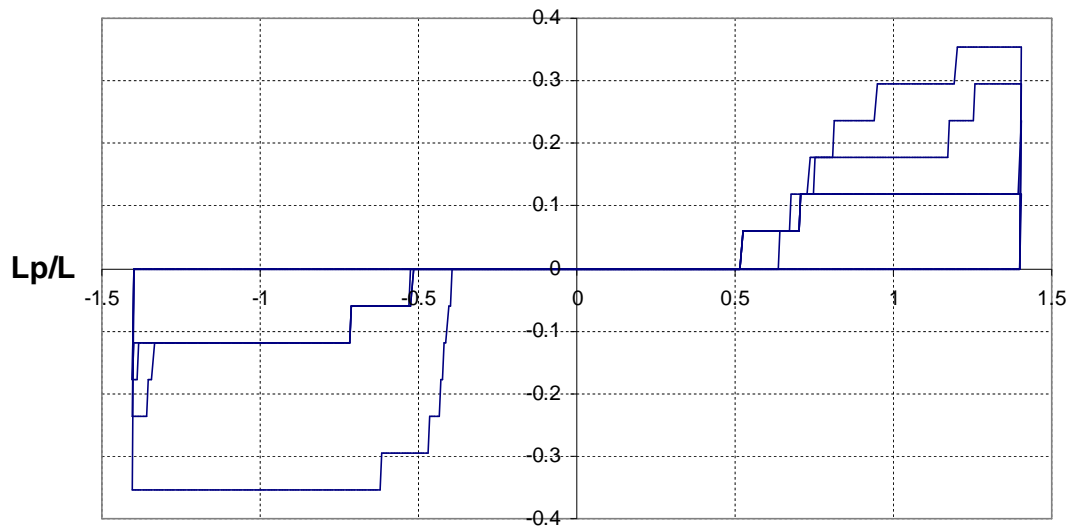
### T20C1Y5 (Lp2)



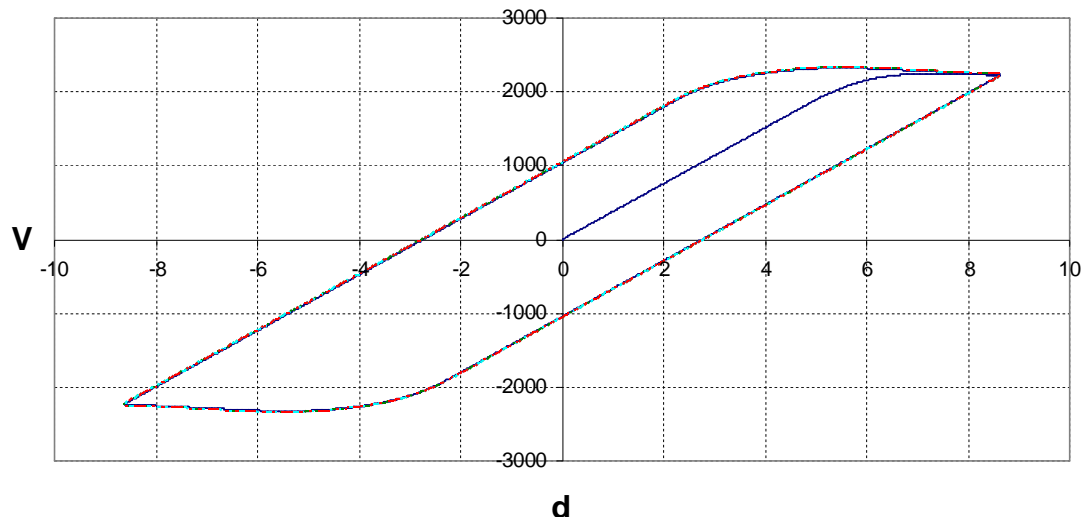
### T20C1Y5 (Lp1)



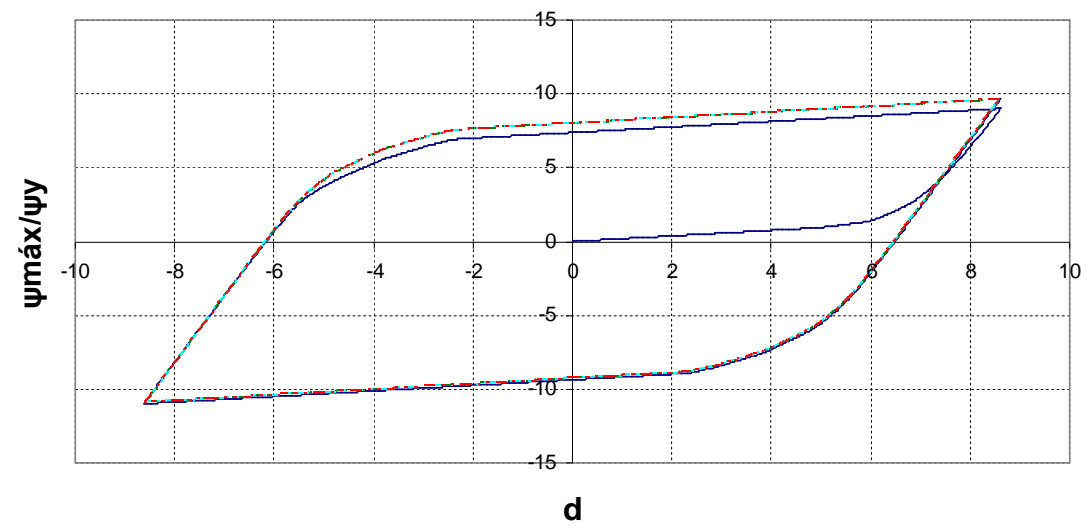
### T20C1Y5 (Lp2)



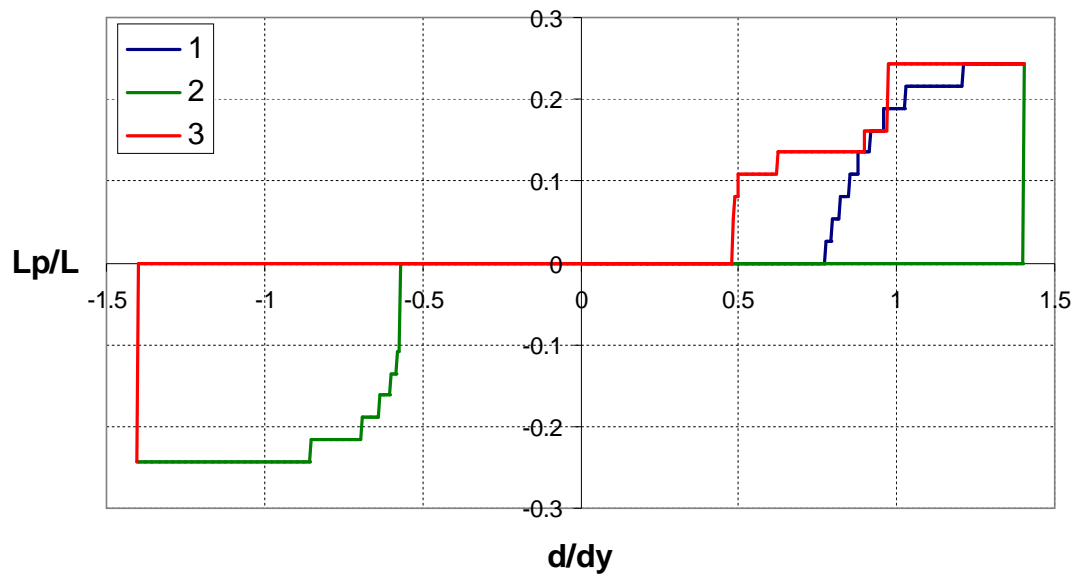
### T20C1Y1



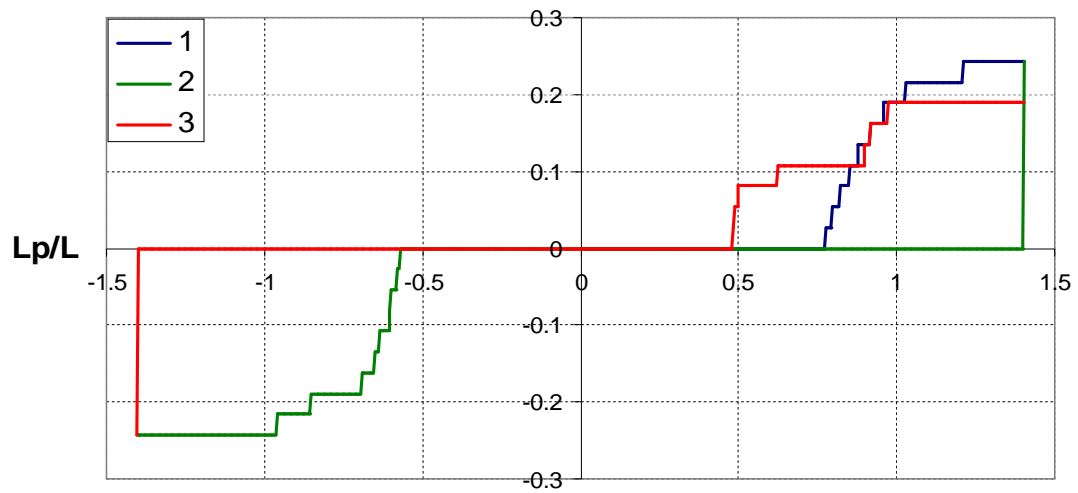
### T20C1Y1



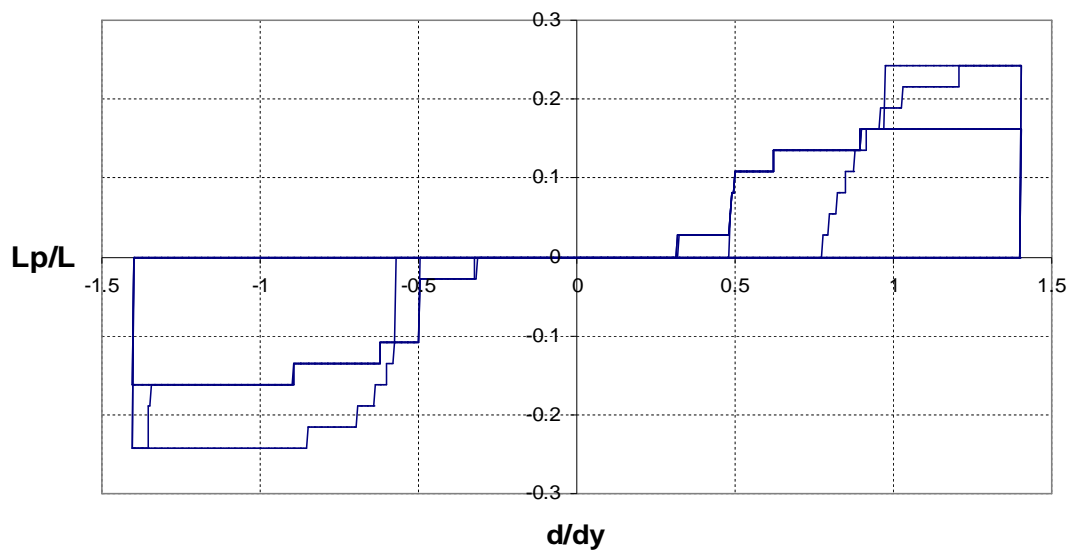
T20C1Y1 (Lp1)



T20C1Y1 (Lp2)

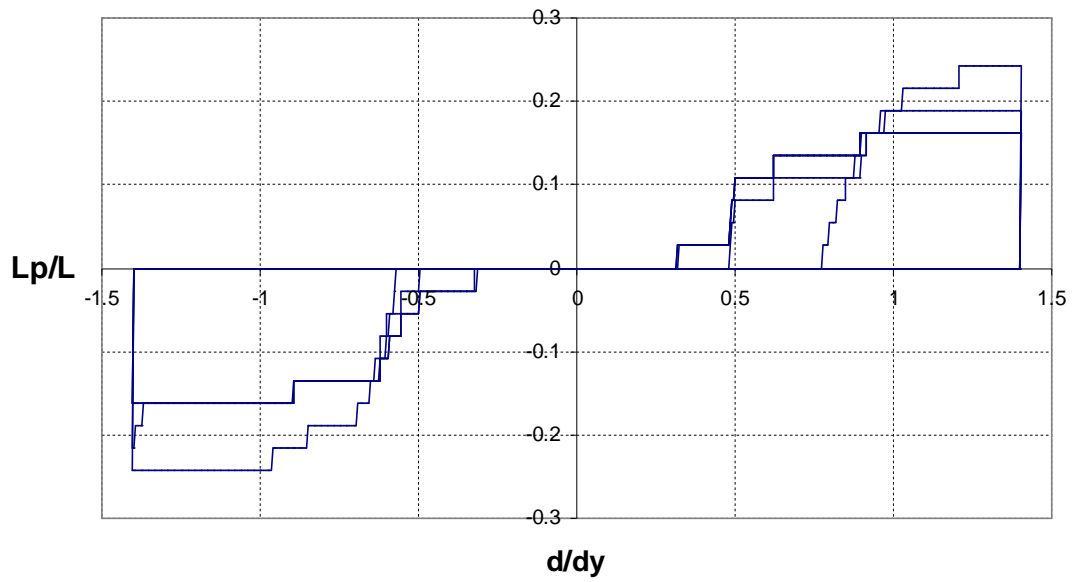


T20C1Y1 (Lp1)

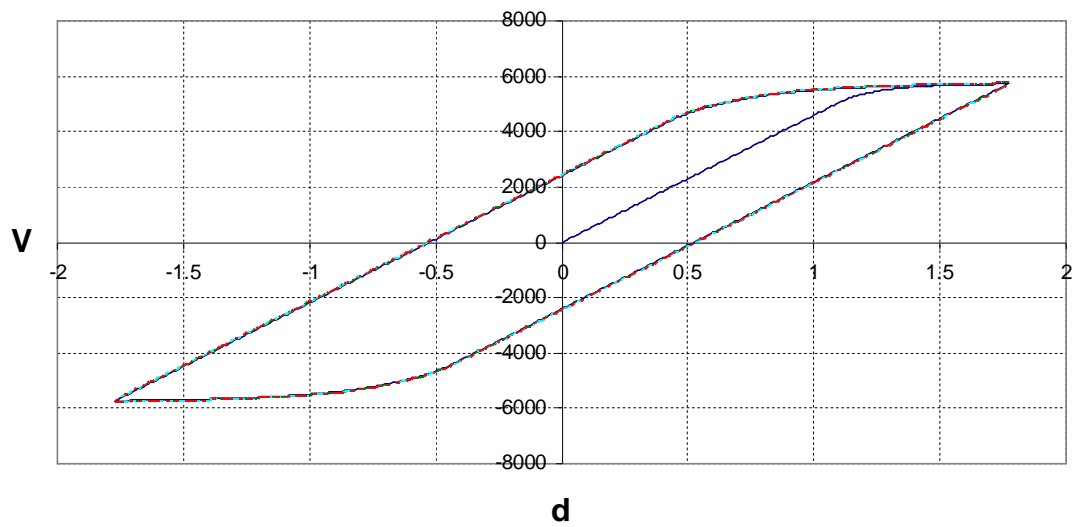




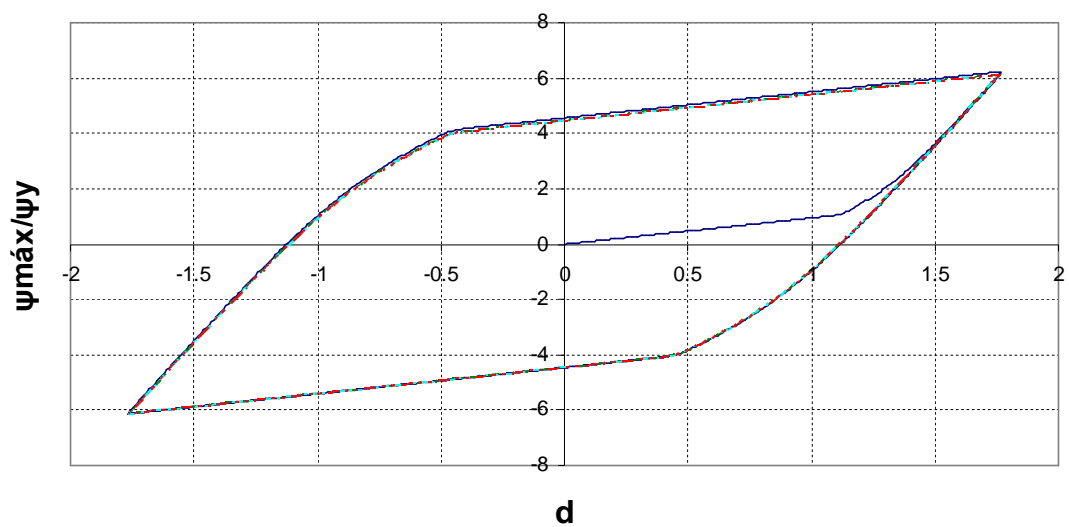
### T20C1Y1 (Lp2)



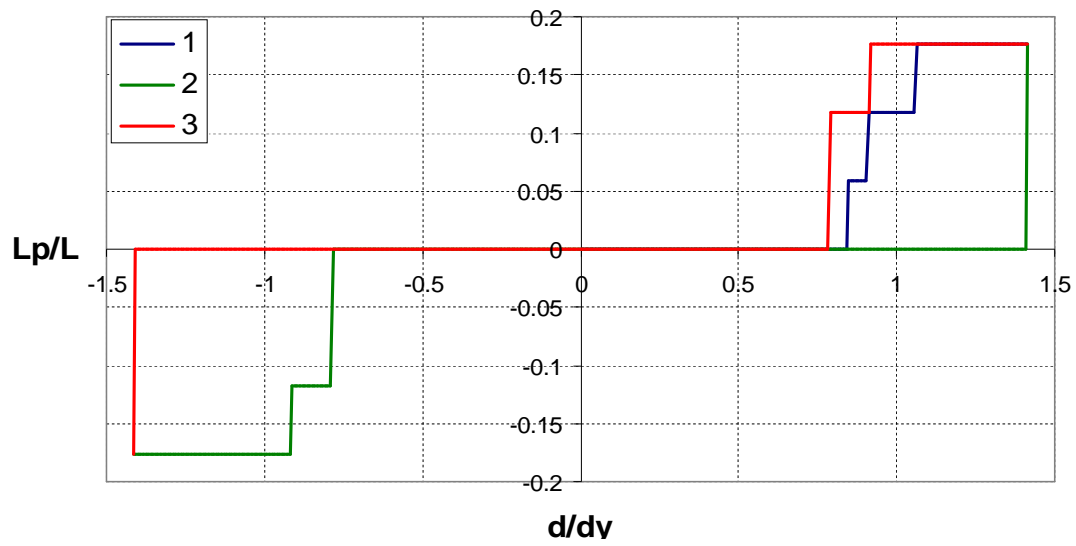
### T20C0Y0L160



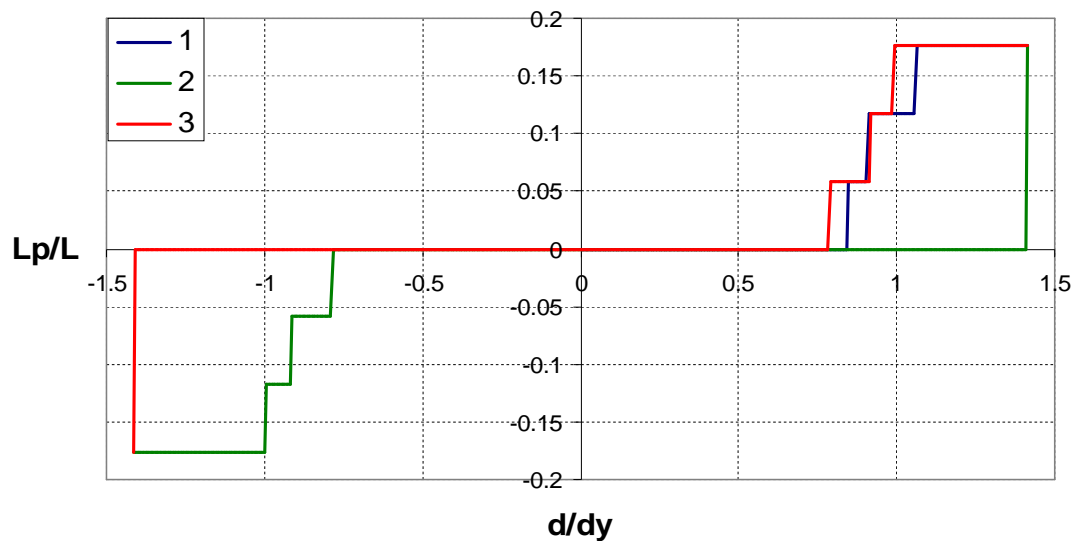
### T20C0Y0L160



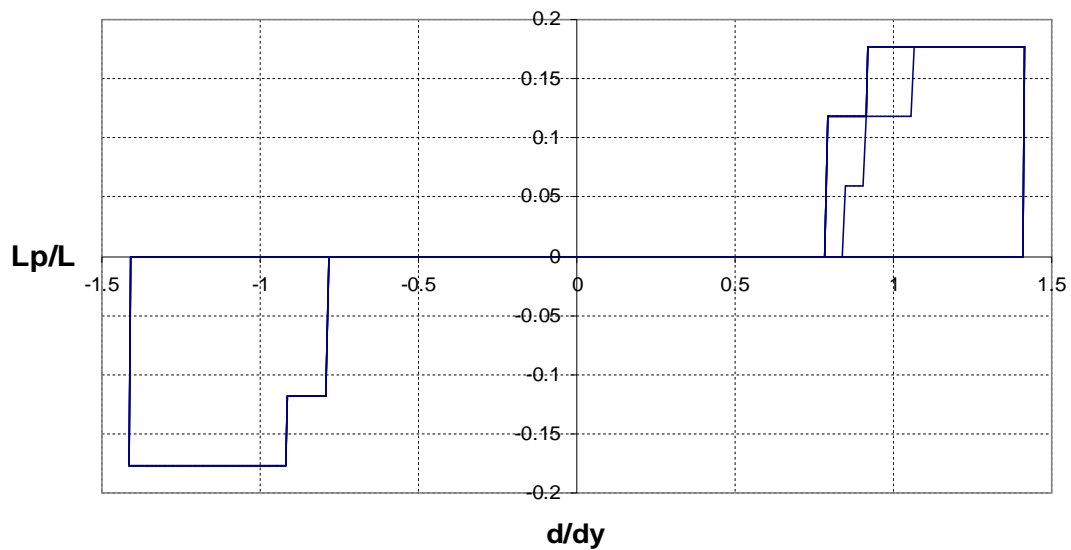
**T20C0Y0L160 (Lp1)**



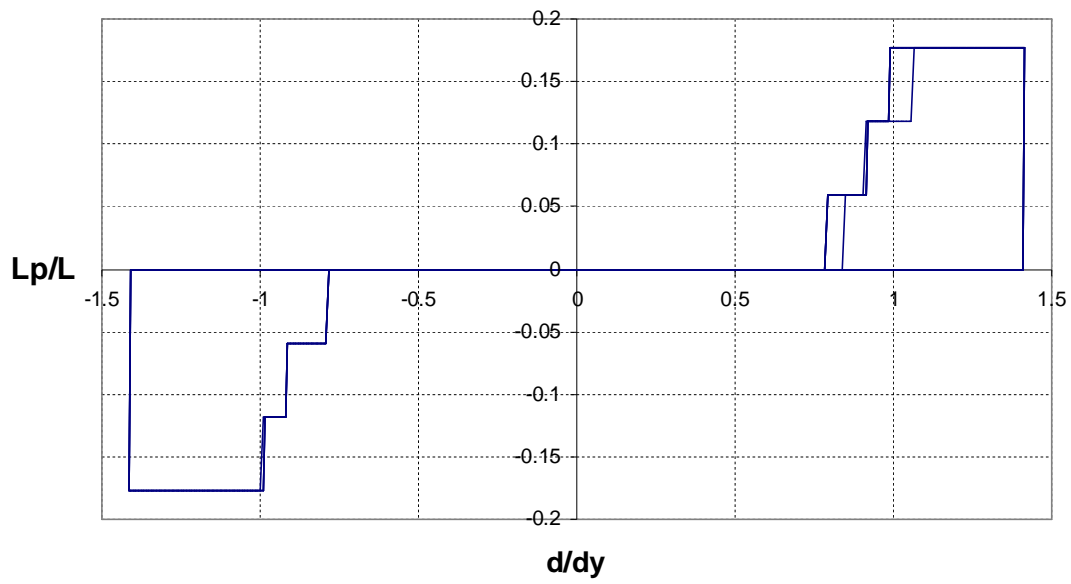
**T20C0Y0L160 (Lp2)**



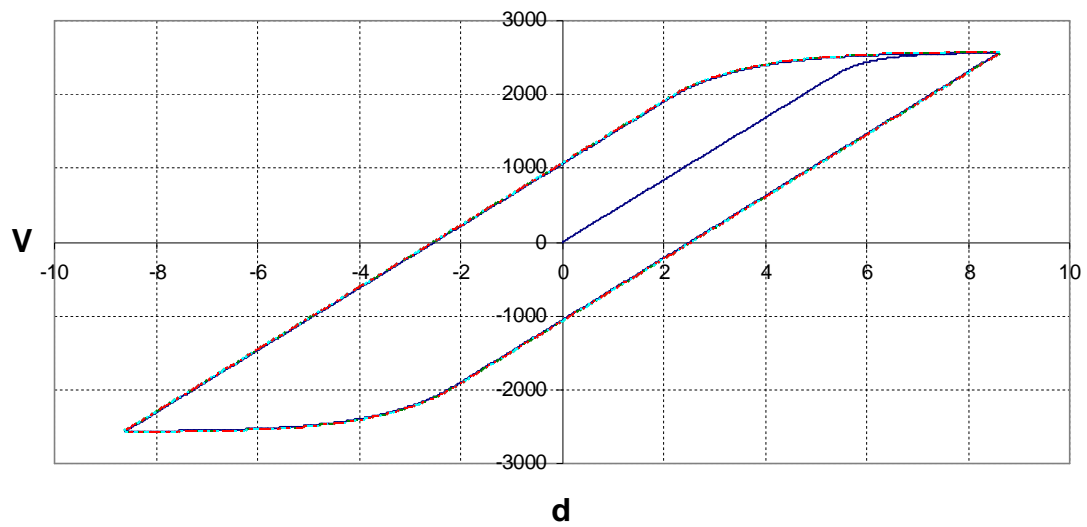
**T20C0Y0L160 (Lp1)**



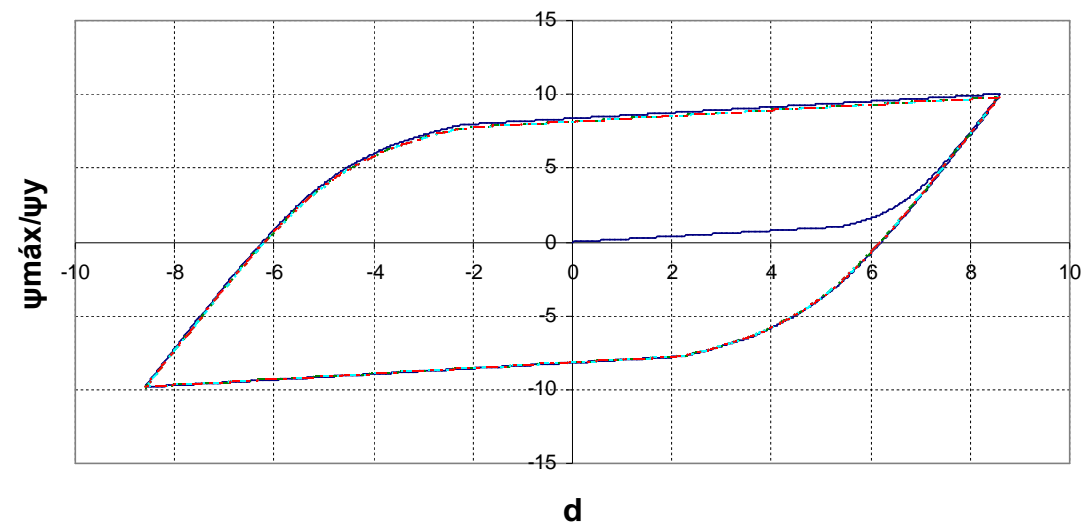
### T20C0Y0L160 (Lp2)



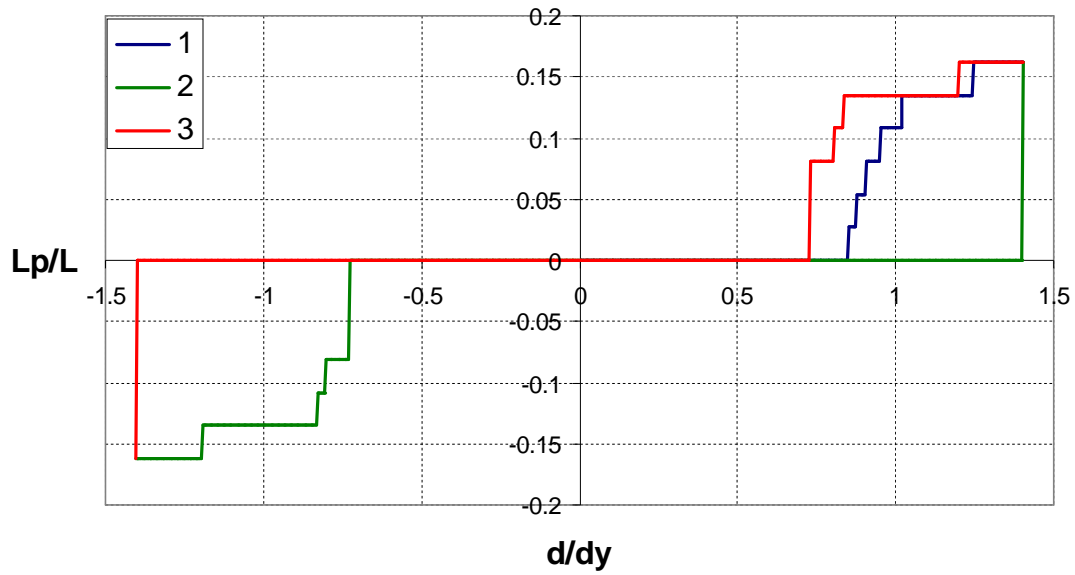
### T20C0Y0L355



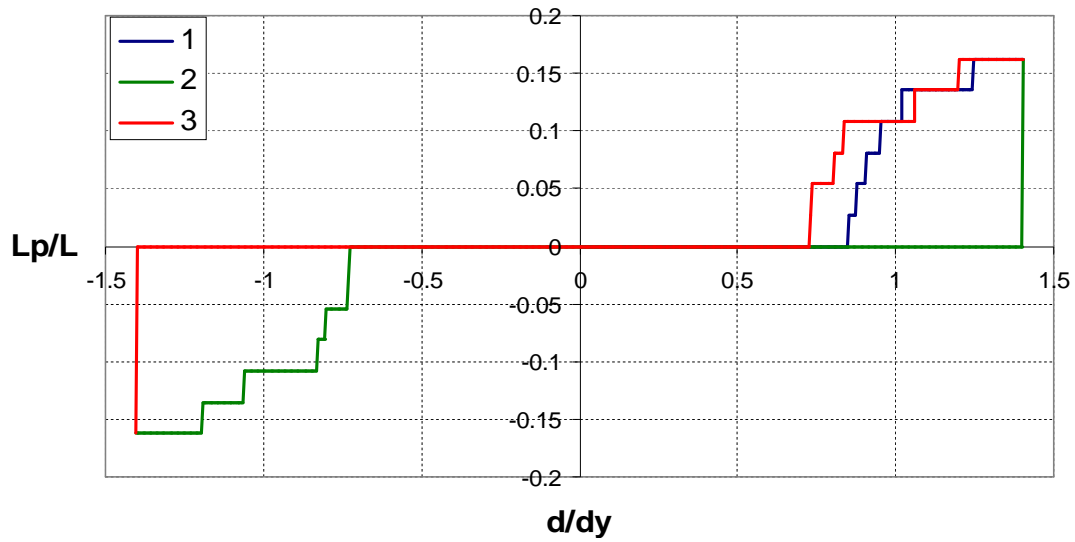
### T20C0Y0L355



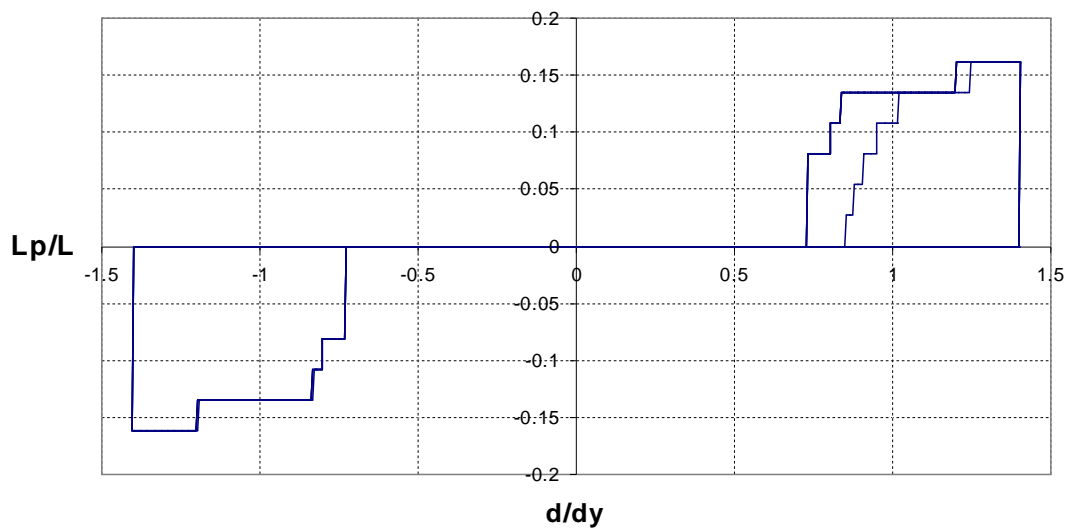
**T20C0Y0L355 (Lp1)**



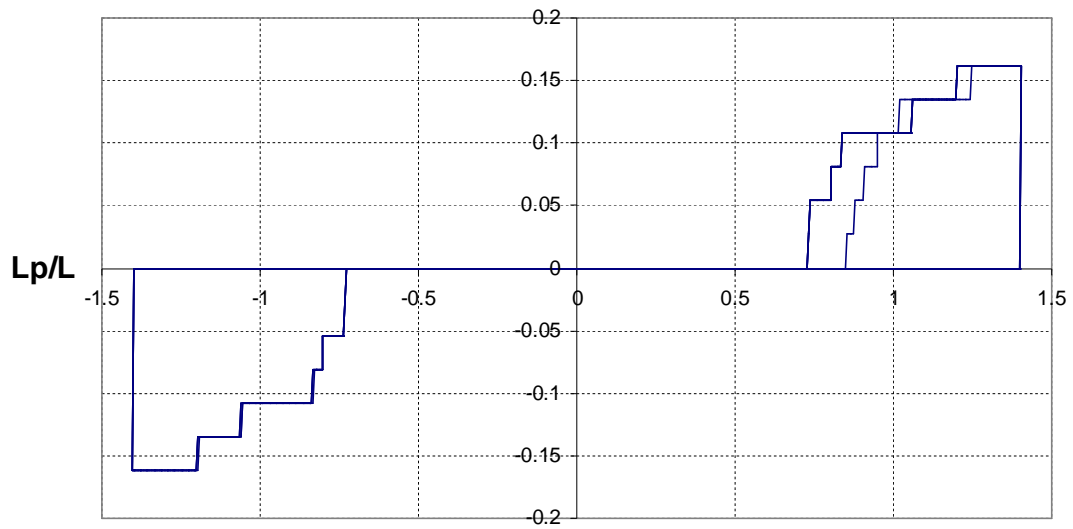
**T20C0Y0L355 (Lp2)**



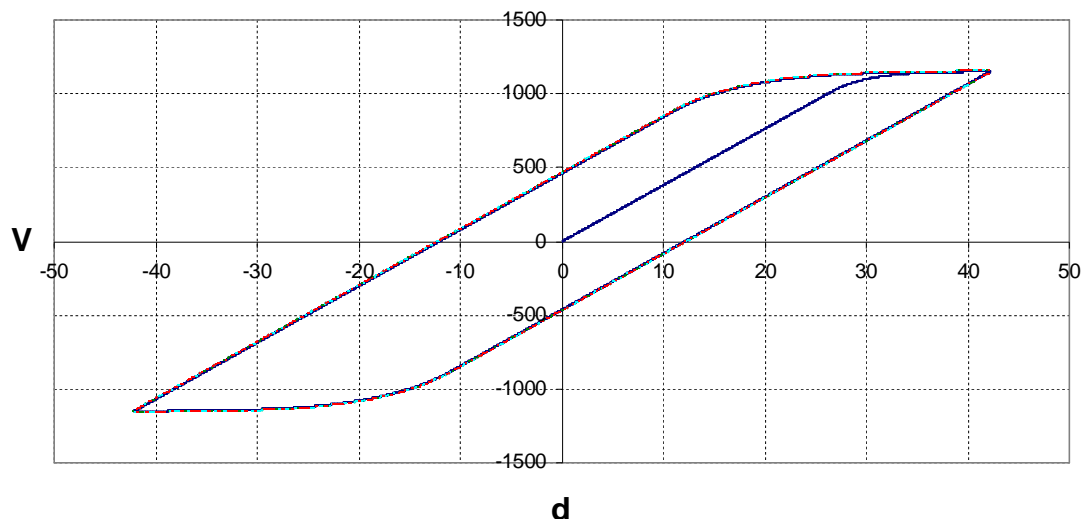
**T20C0Y0L355 (Lp1)**



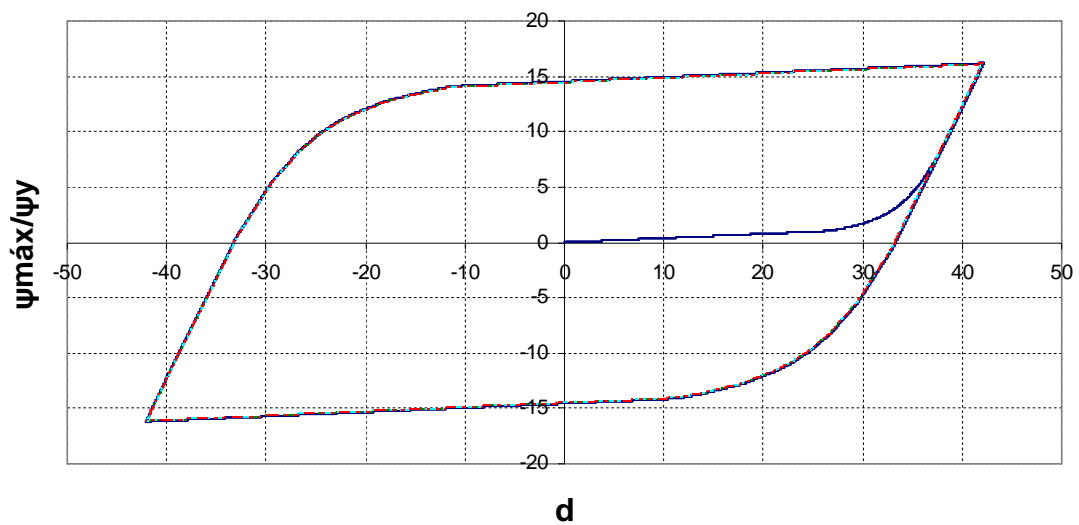
### T20C0Y0L355 (Lp2)



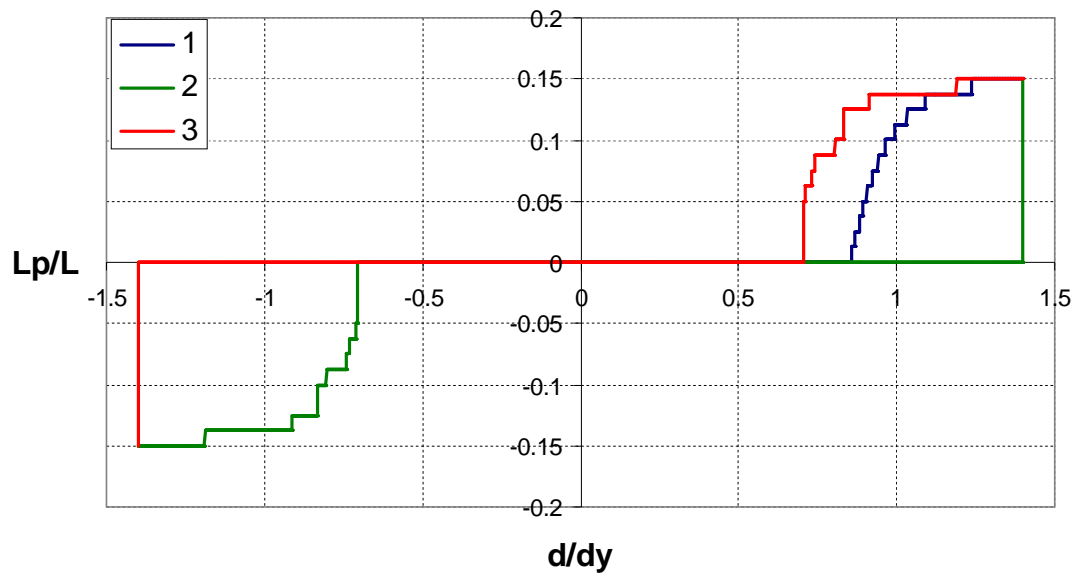
### T20C0Y0L790



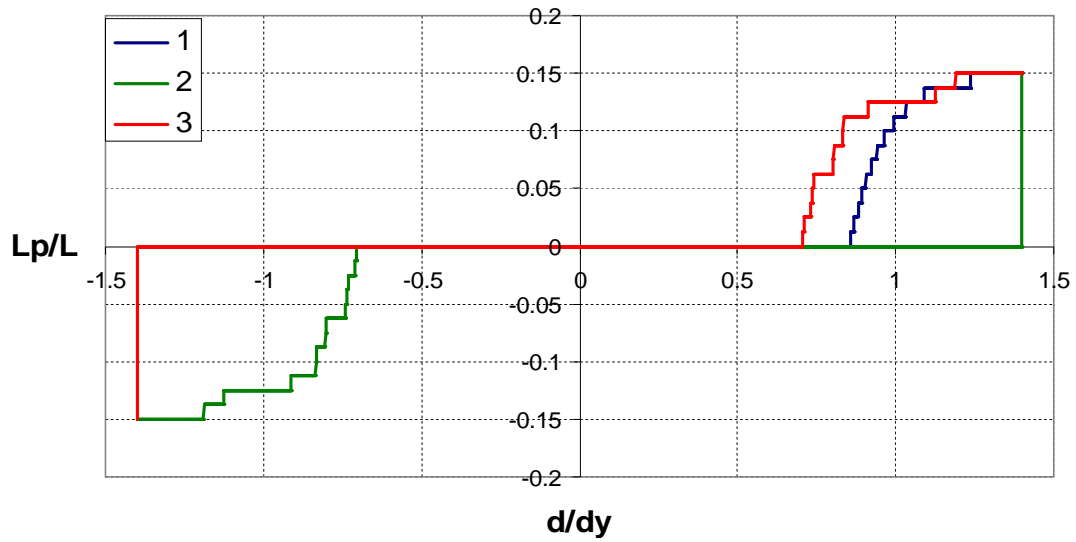
### T20C0Y0L790



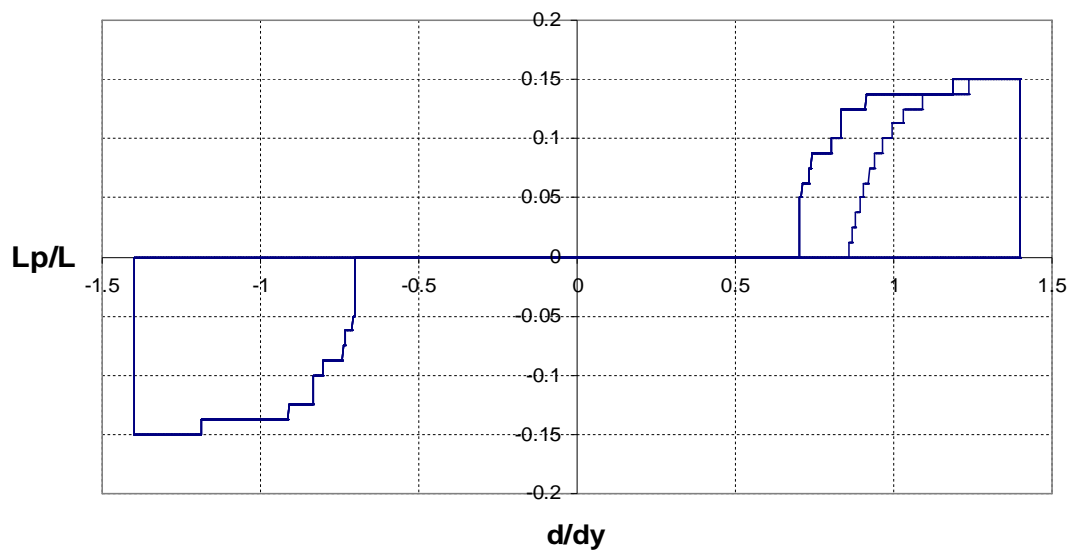
**T20C0Y0L790 (Lp1)**



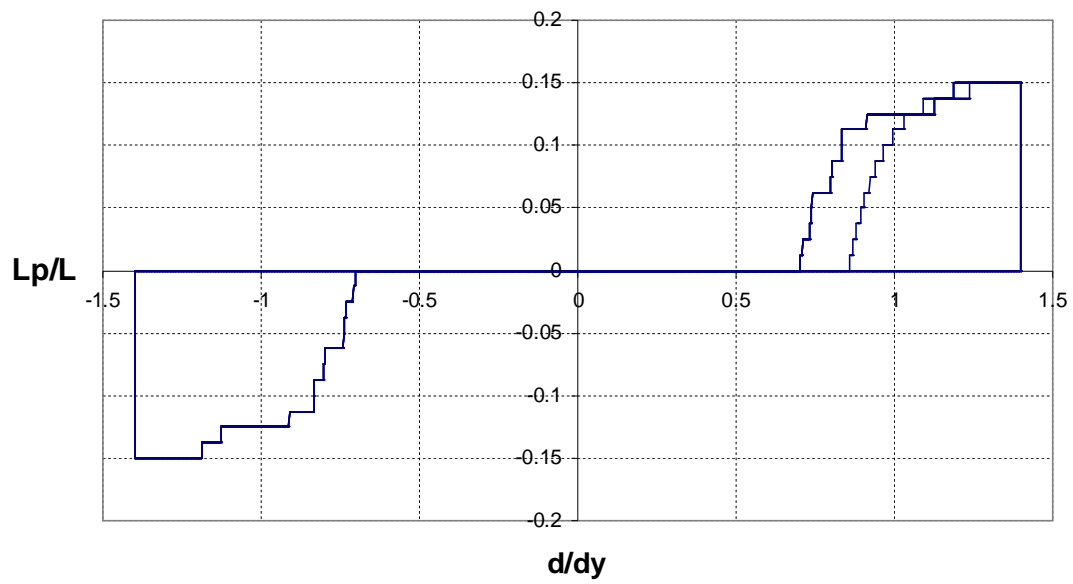
**T20C0Y0L790 (Lp2)**



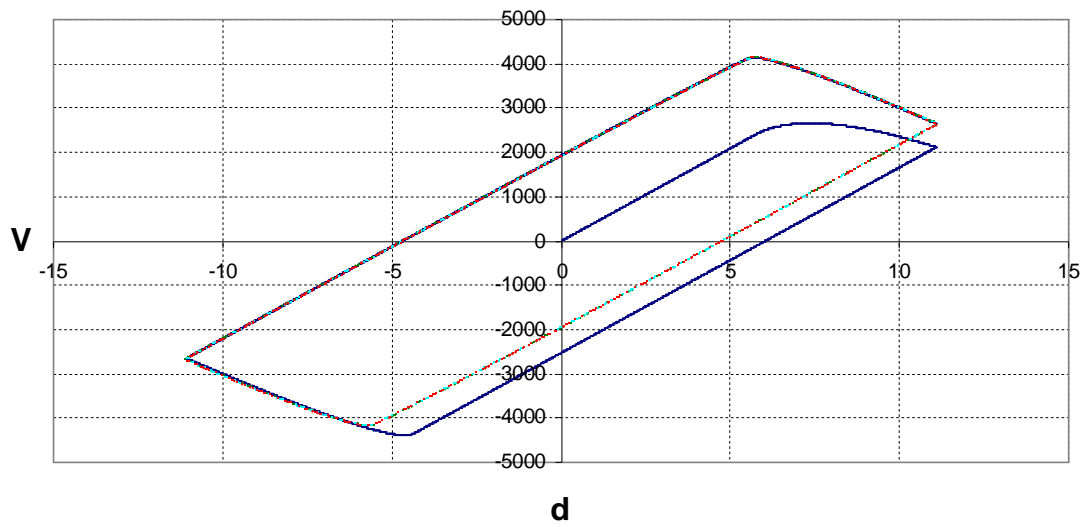
**T20C0Y0L790 (Lp1)**



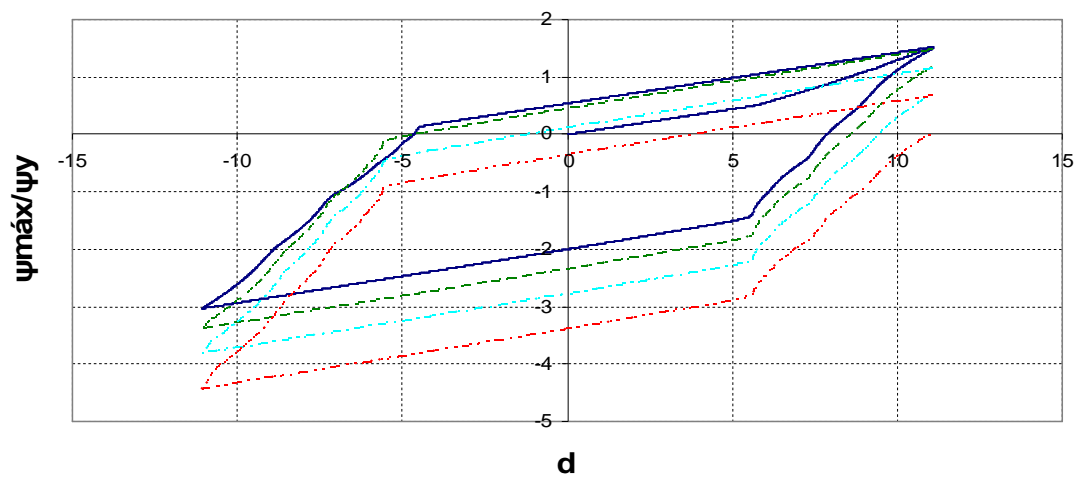
**T20C0Y0L790 (Lp2)**



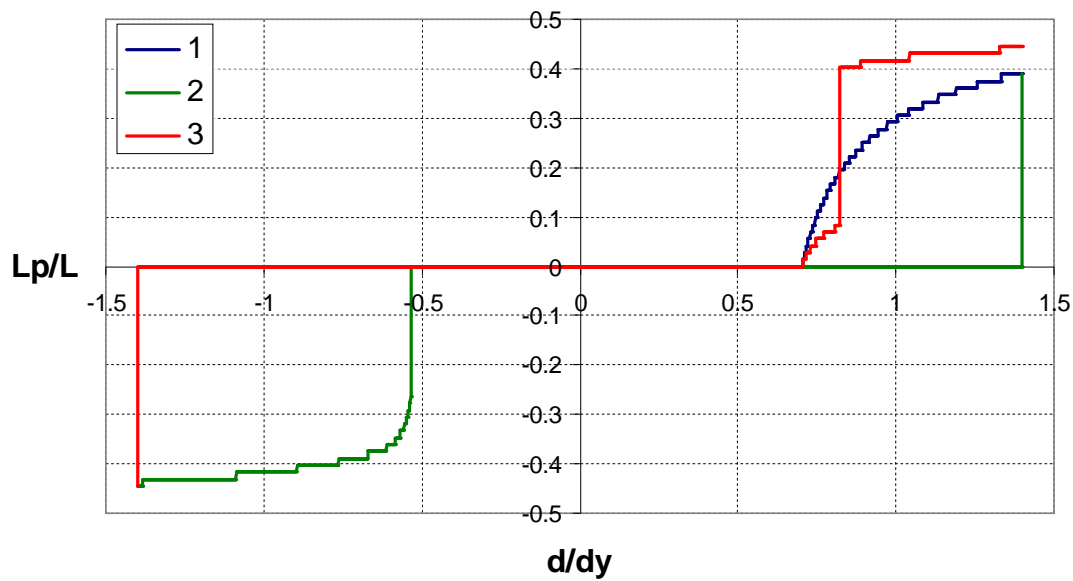
### T40C5Y5



### T40C5Y5

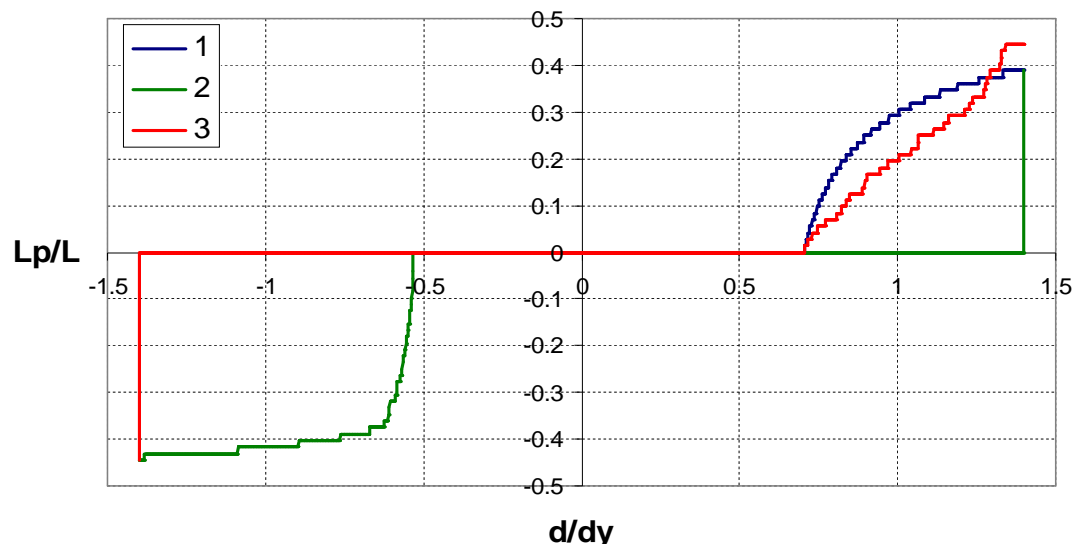


### T40C5Y5 (Lp1)

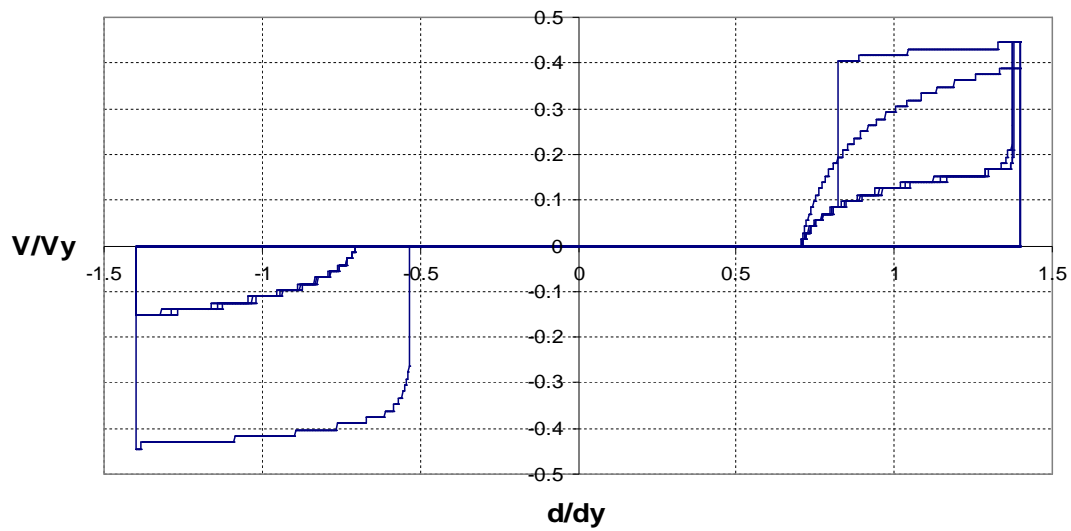




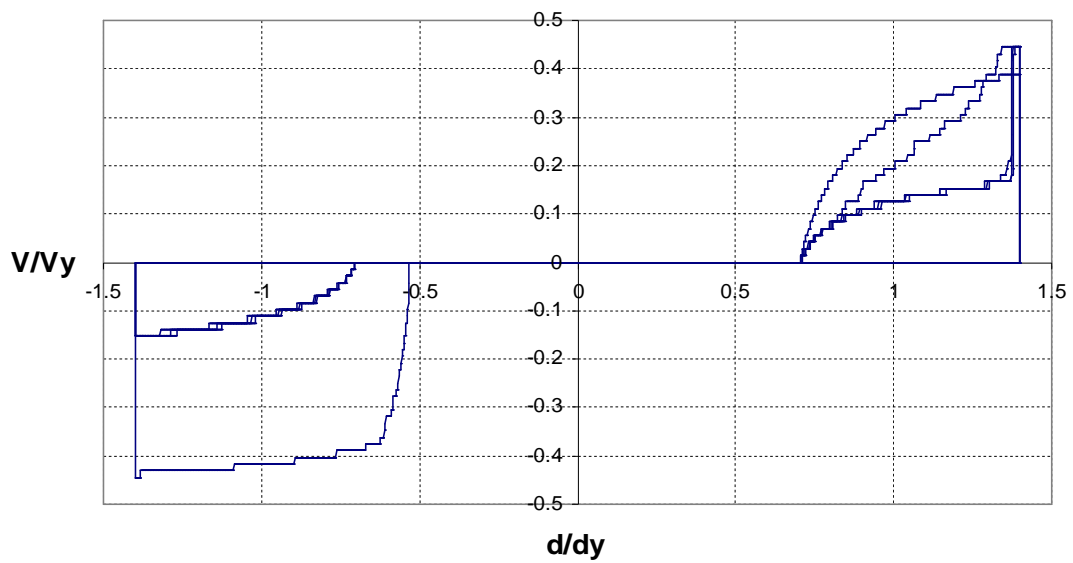
### T40C5Y5 (Lp2)



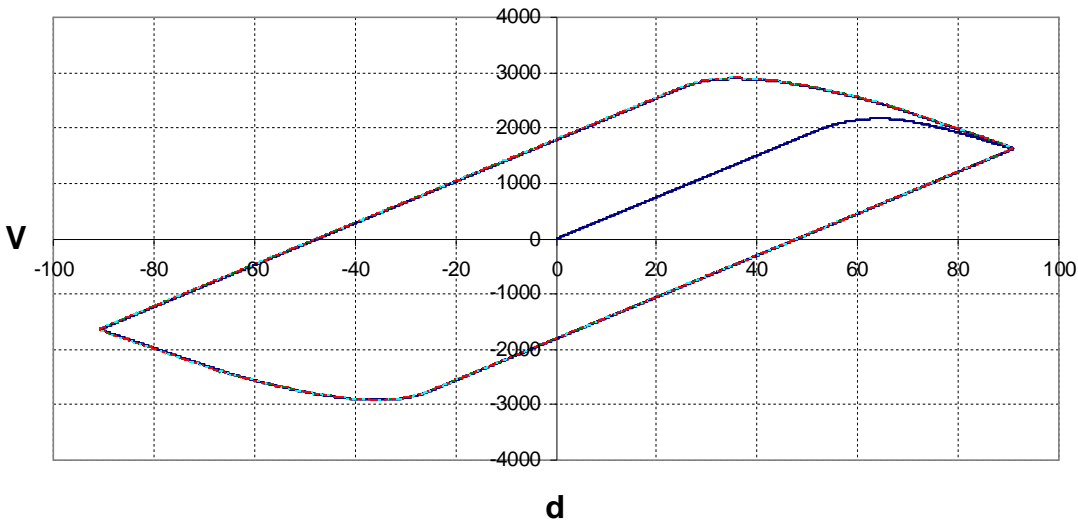
### T40C5Y5 (Lp1)



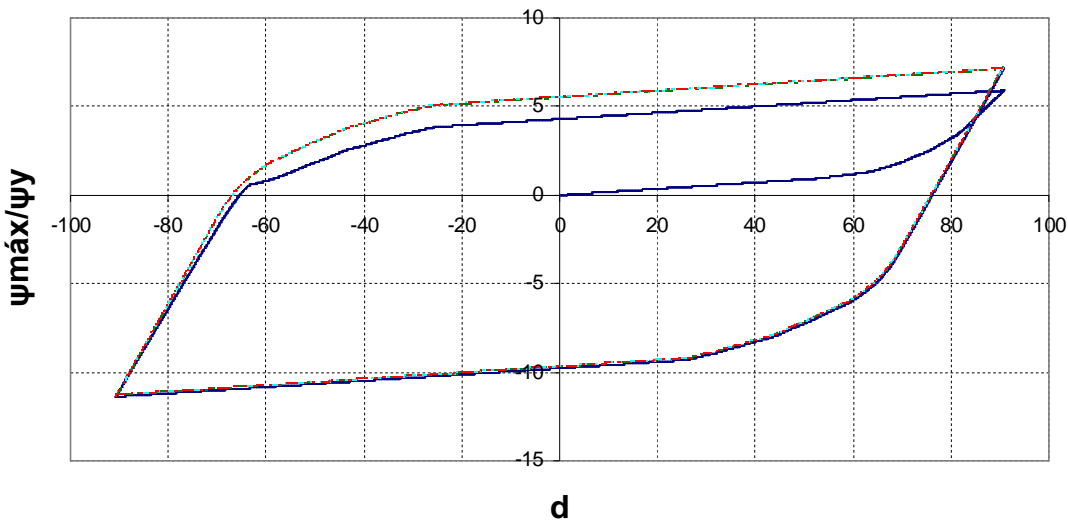
### T40C5Y5 (Lp2)



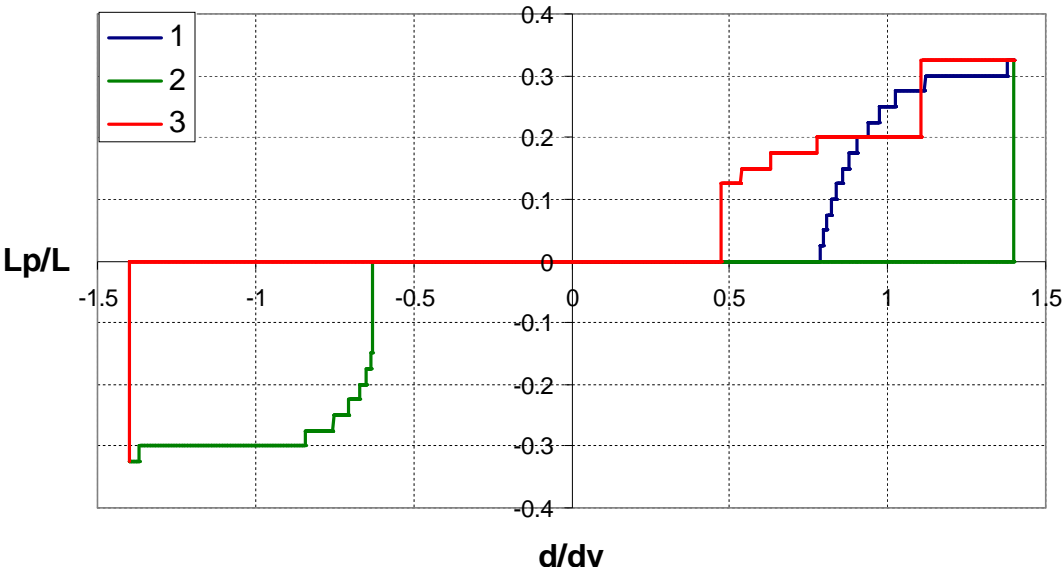
T40C5Y1



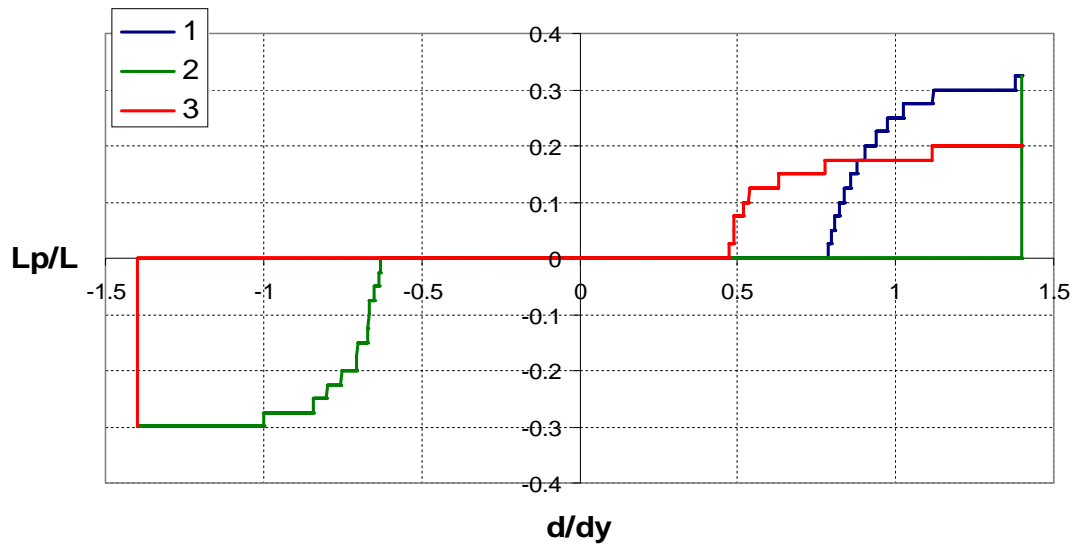
T40C5Y1



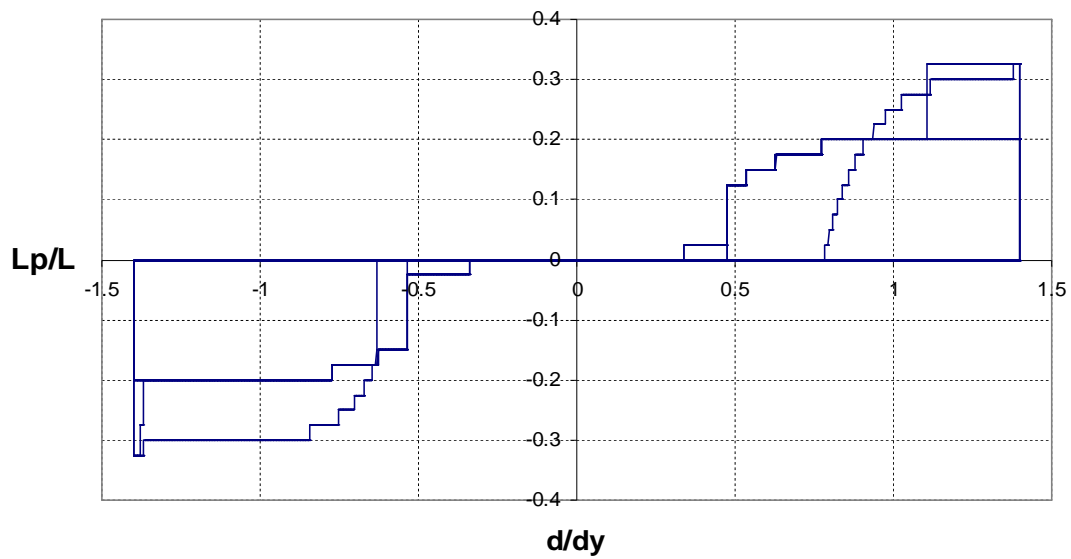
T40C5Y1 (Lp1)



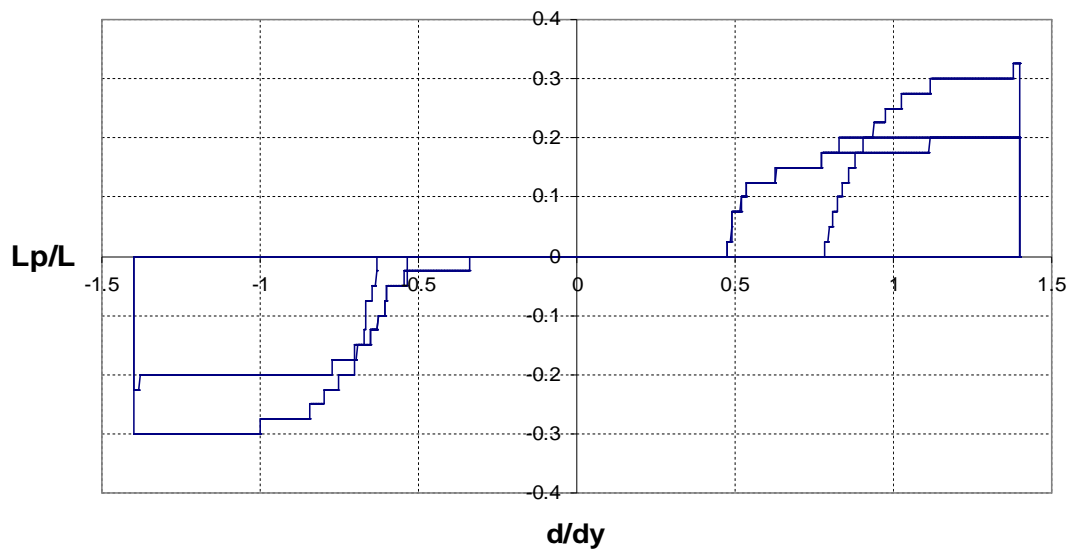
**T40C5Y1 (Lp2)**



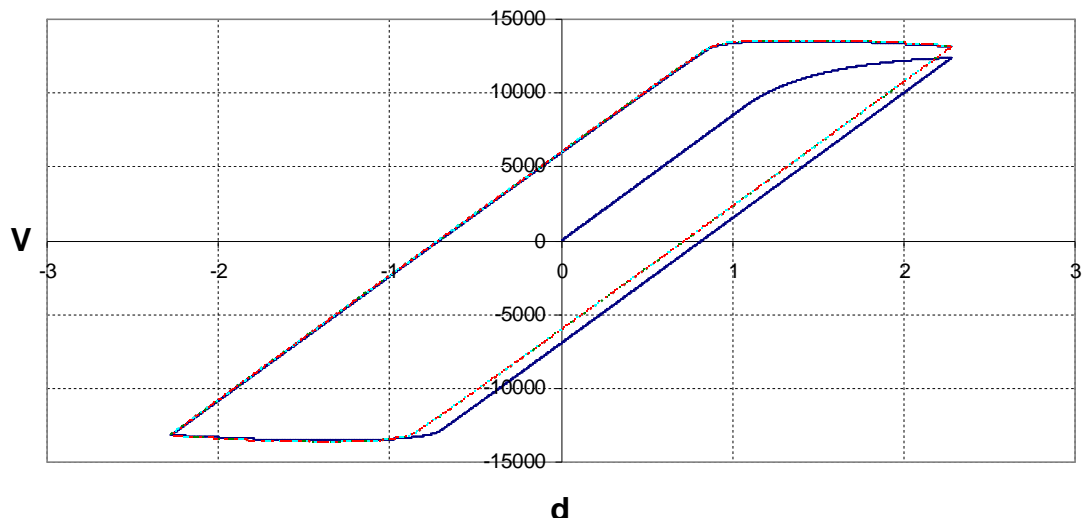
**T40C5Y1 (Lp1)**



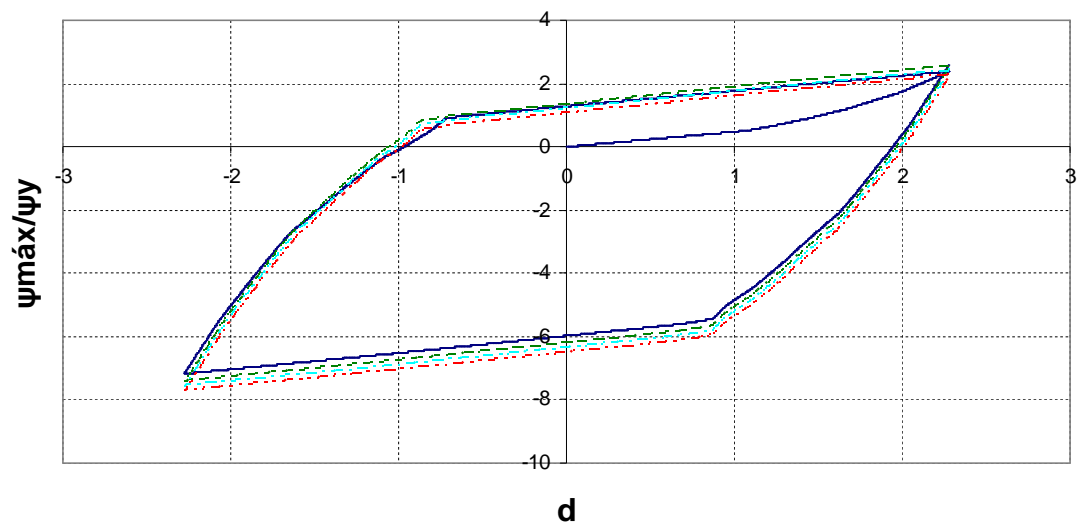
**T40C5Y1 (Lp2)**



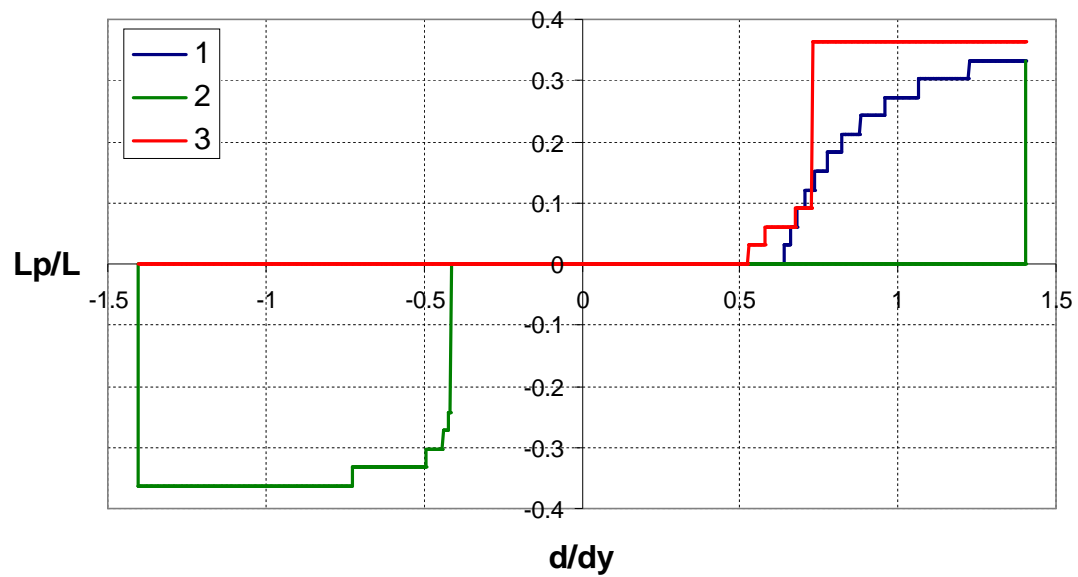
### T40C1Y5



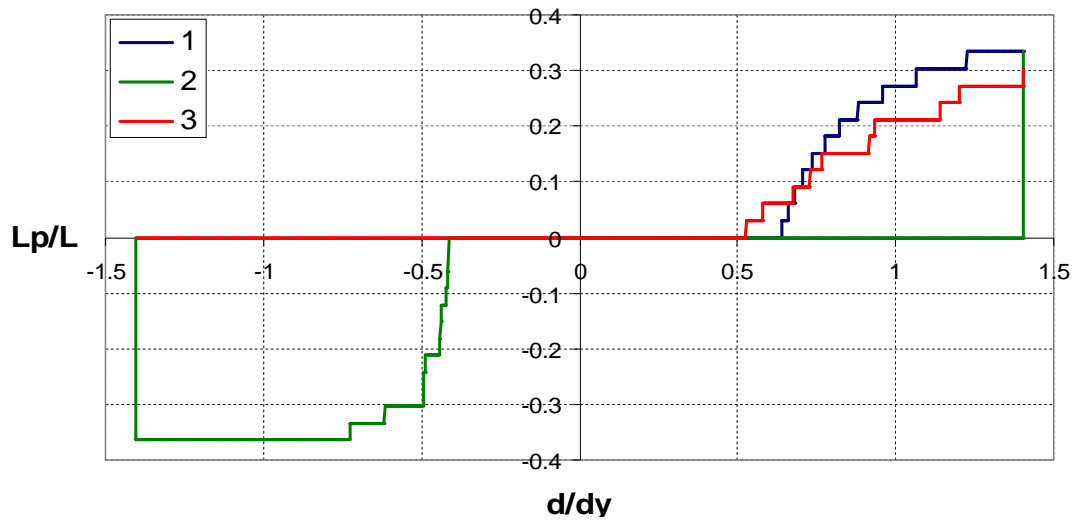
### T40C1Y5



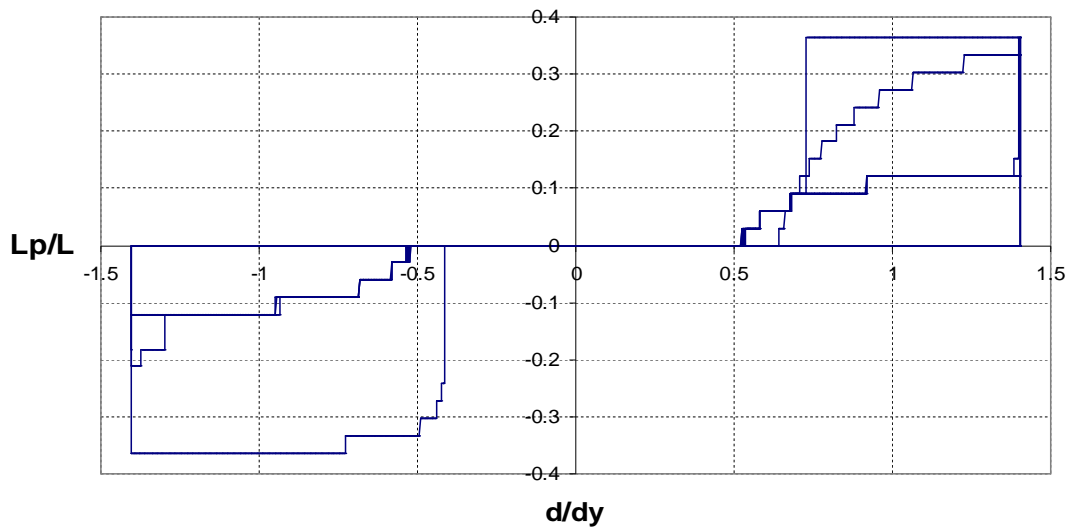
### T40C1Y5 (Lp1)



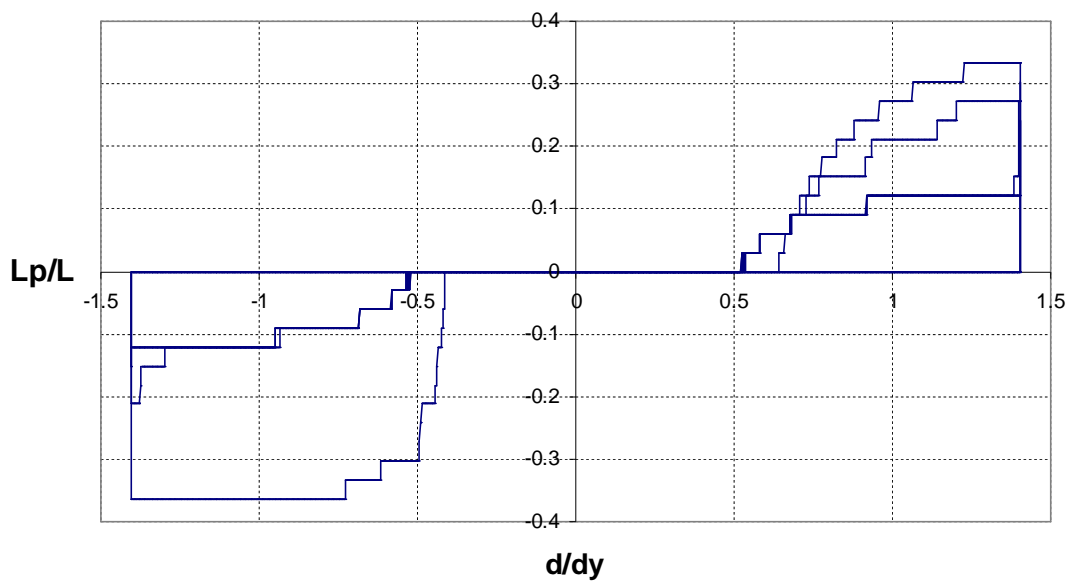
**T40C1Y5 (Lp2)**



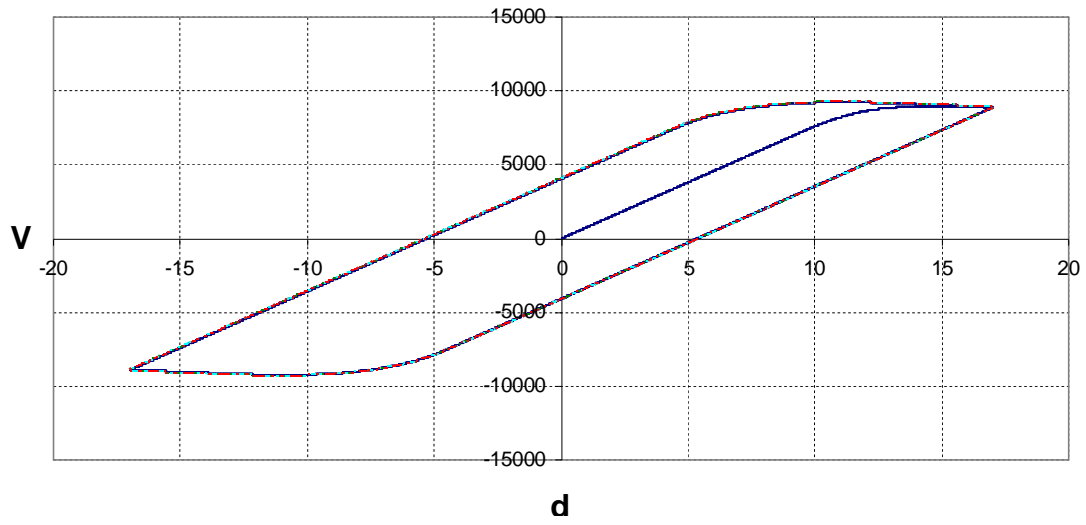
**T40C1Y5 (Lp1)**



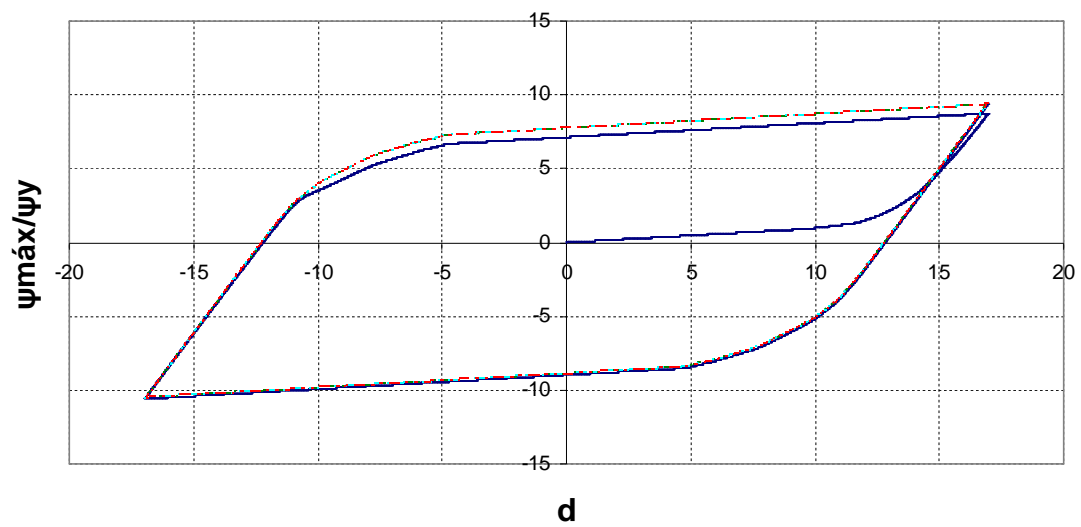
**T40C1Y5 (Lp2)**



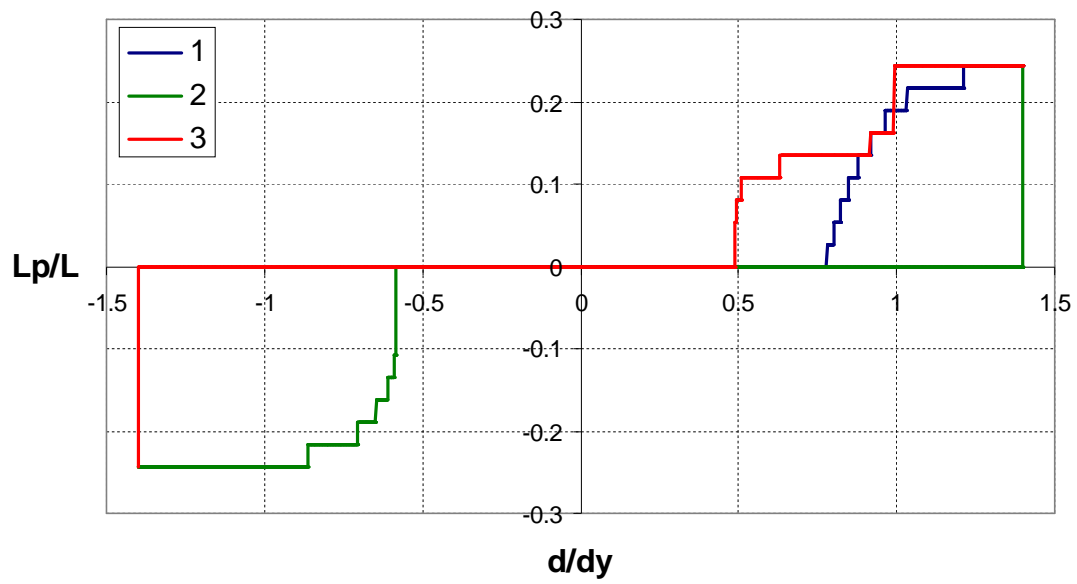
### T40C1Y1



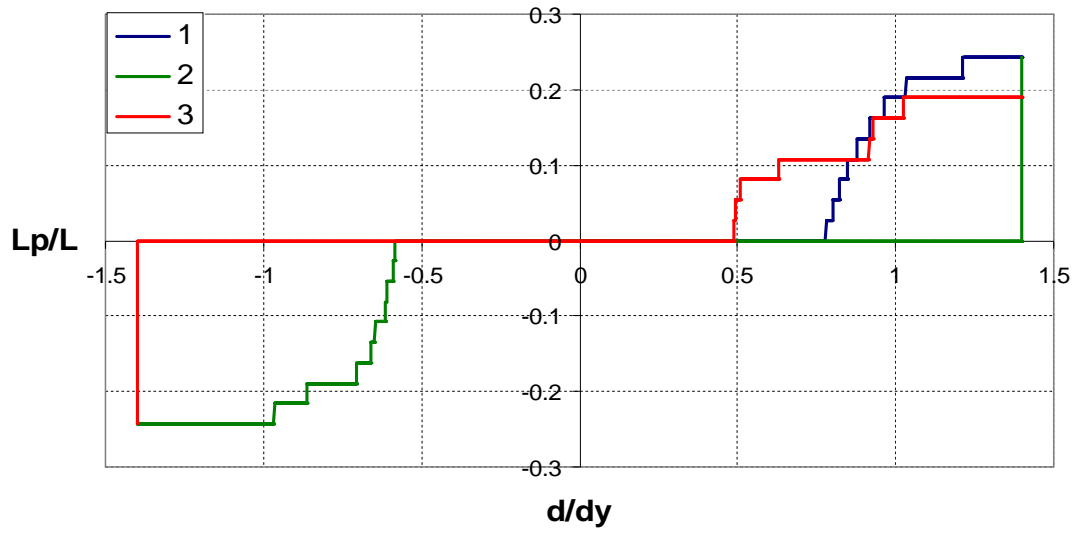
### T40C1Y1



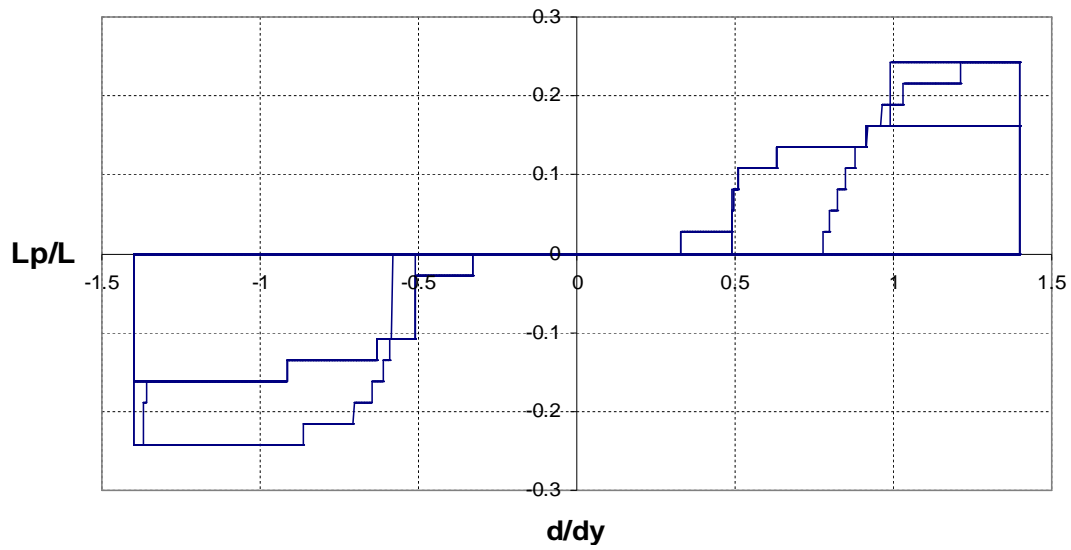
### T40C1Y1 (Lp1)



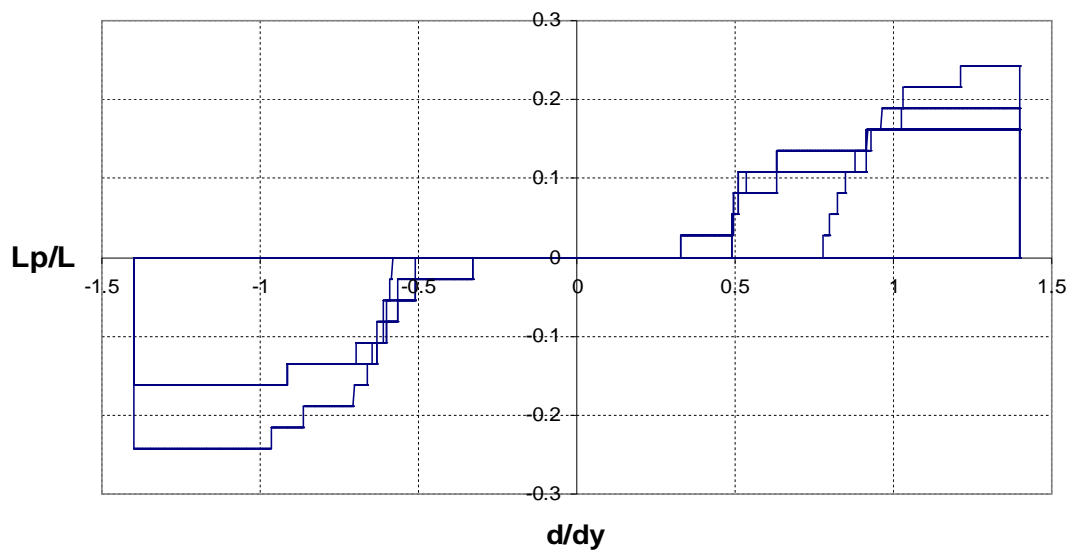
**T40C1Y1 (Lp2)**



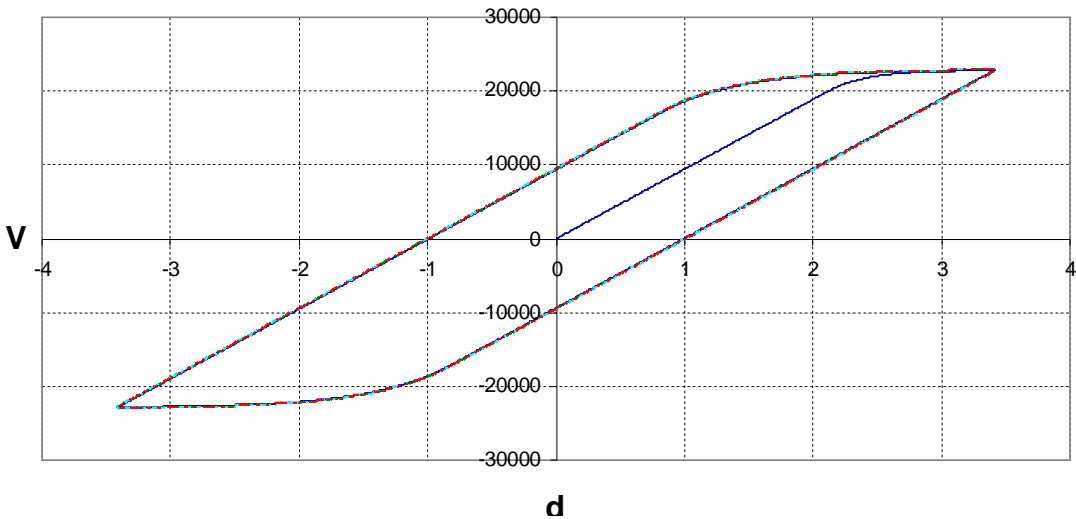
**T40C1Y1 (Lp1)**



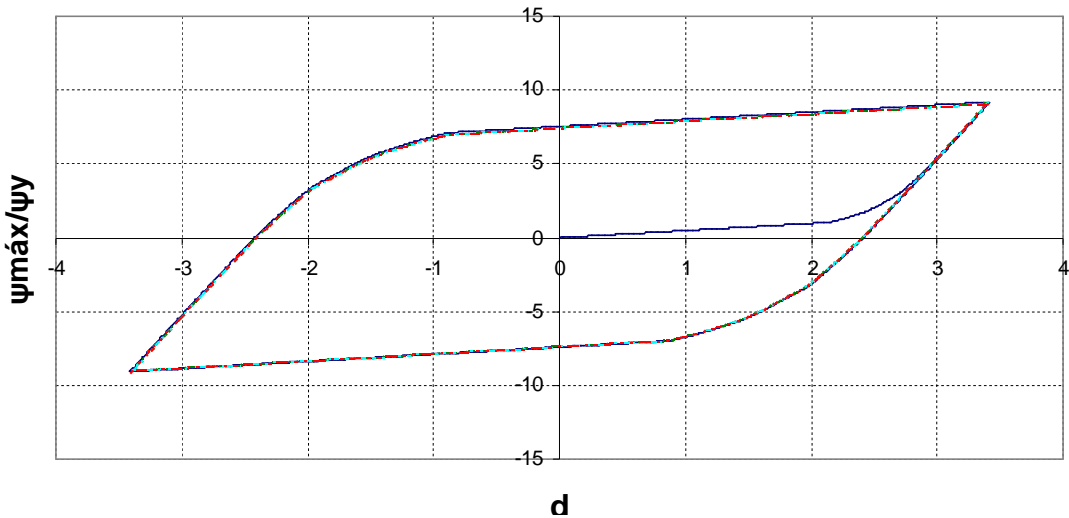
**T40C1Y1 (Lp2)**



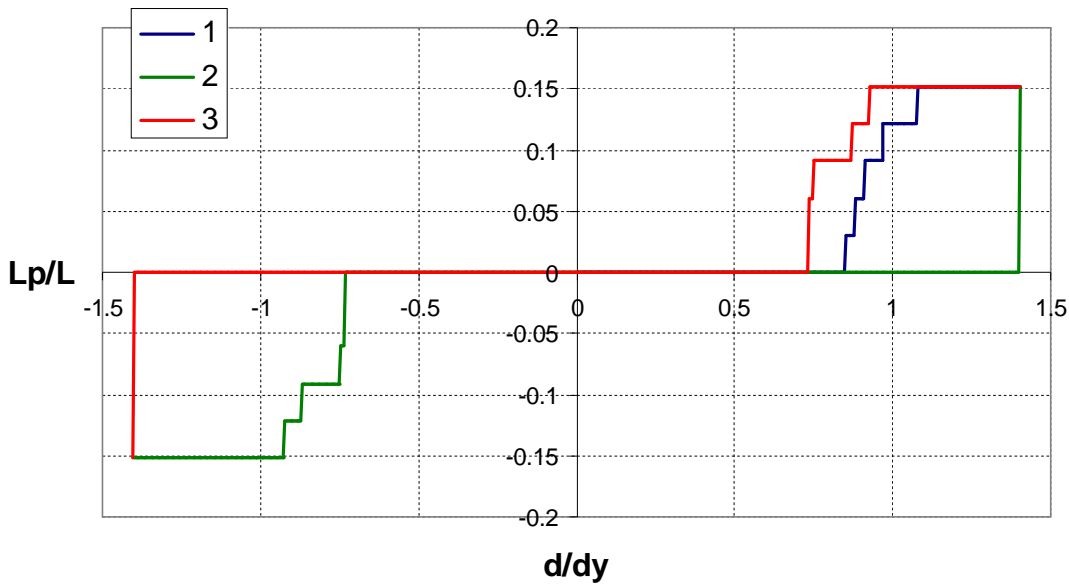
T40C0Y0L316



T40C0Y0L316

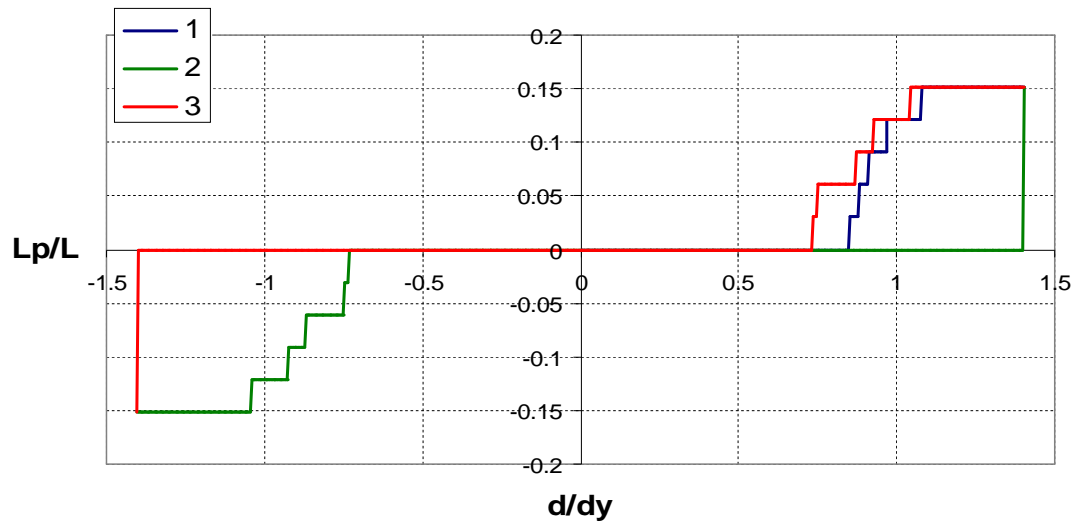


T40C0Y0L316 (Lp1)

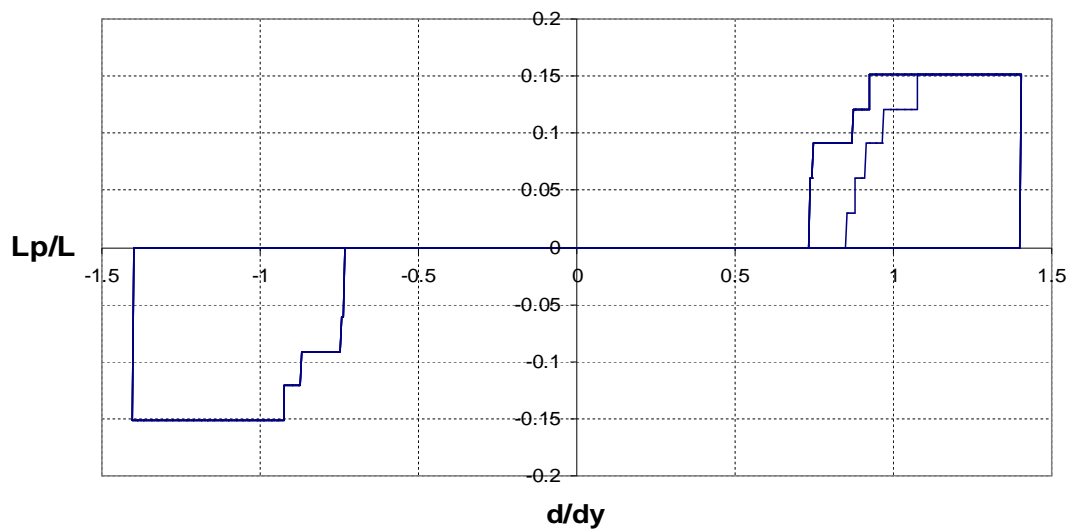




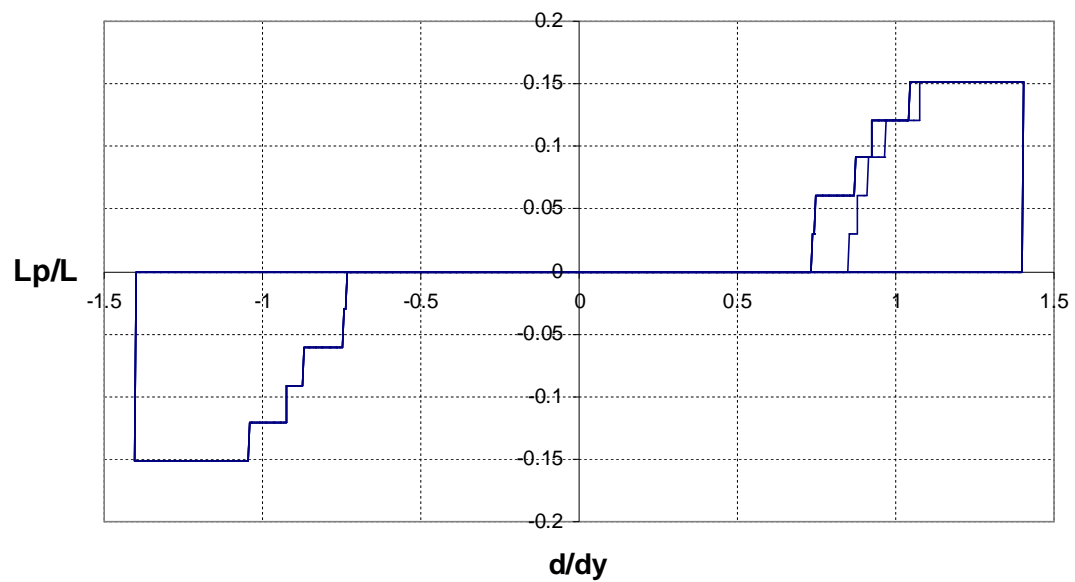
**T40C0Y0L316 (Lp2)**



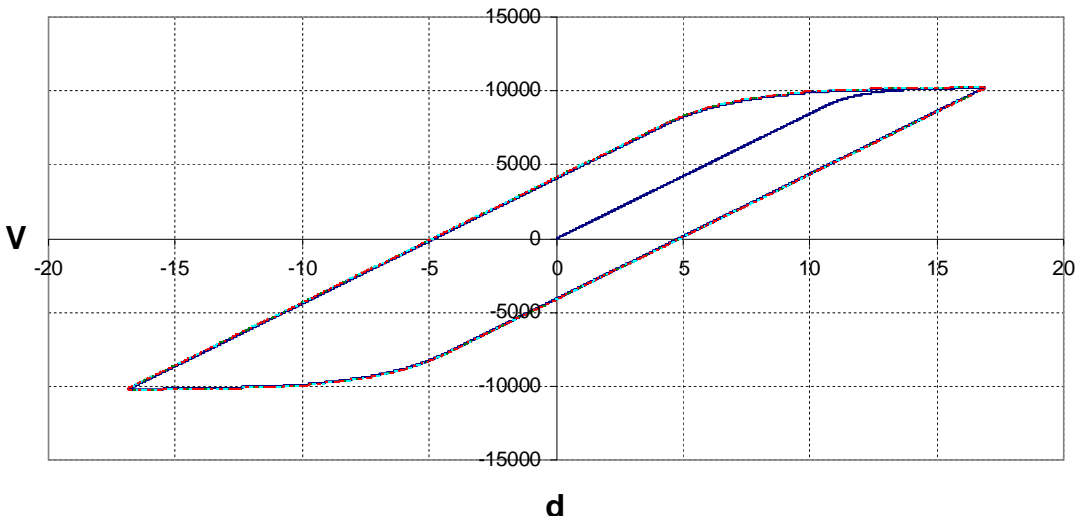
**T40C0Y0L316 (Lp1)**



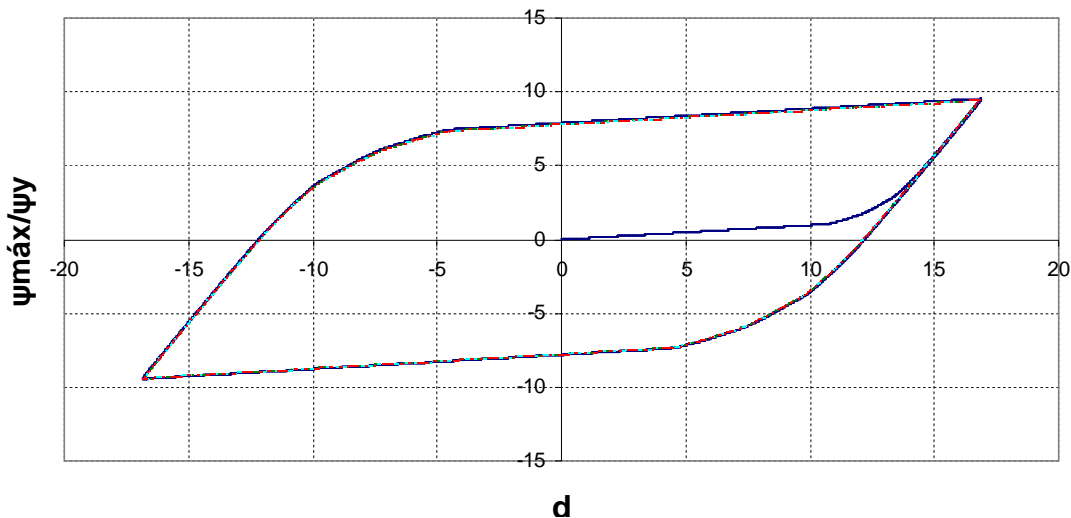
**T40C0Y0L316 (Lp2)**



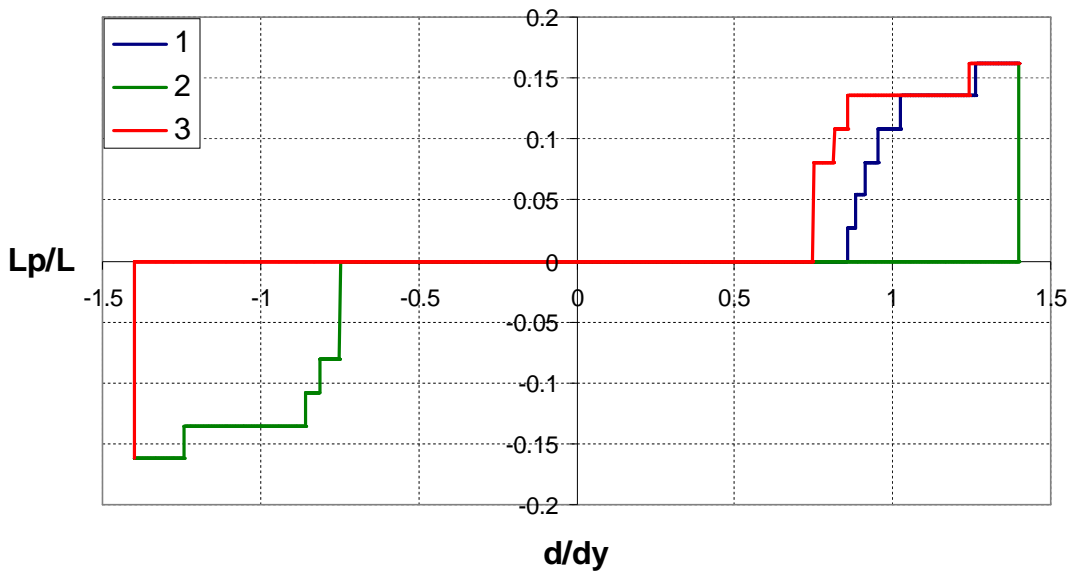
T40C0Y0L706



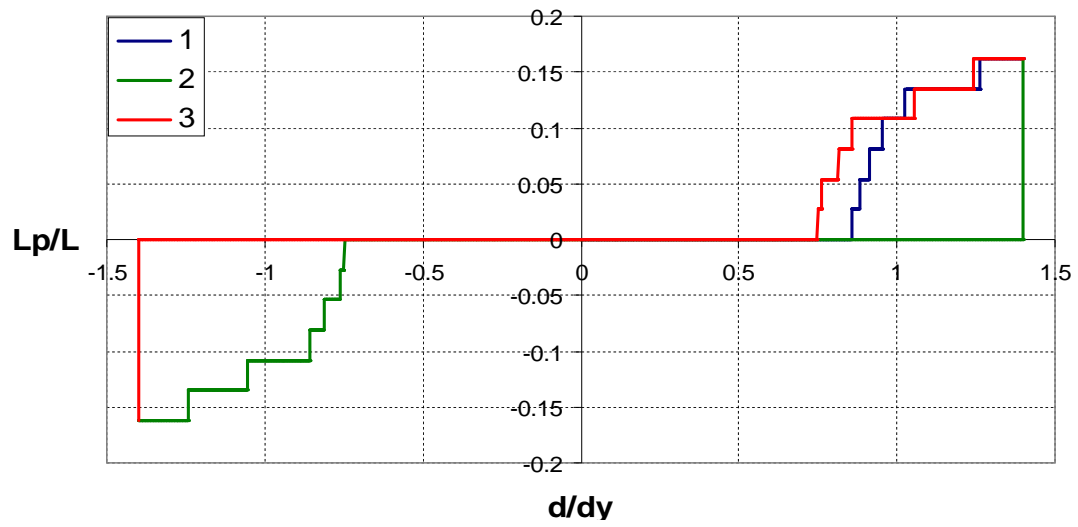
T40C0Y0L706



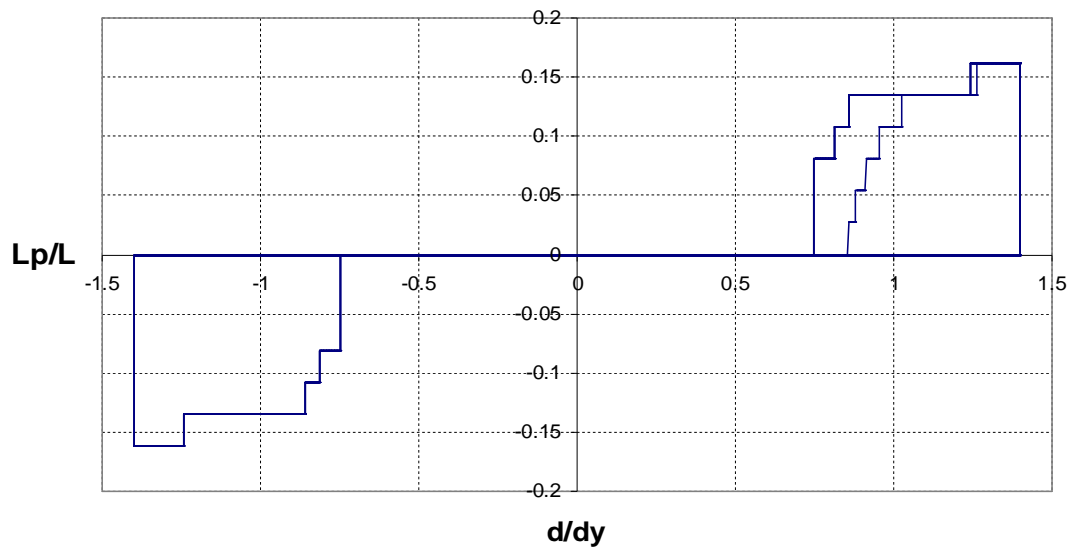
T40C0Y0L706 (Lp1)



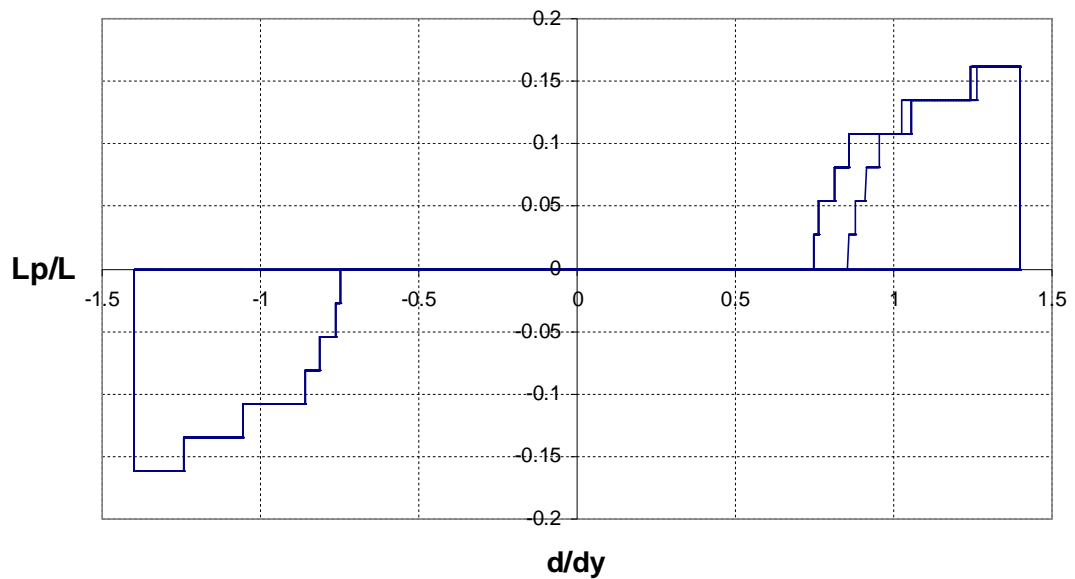
**T40C0Y0L706 (Lp2)**



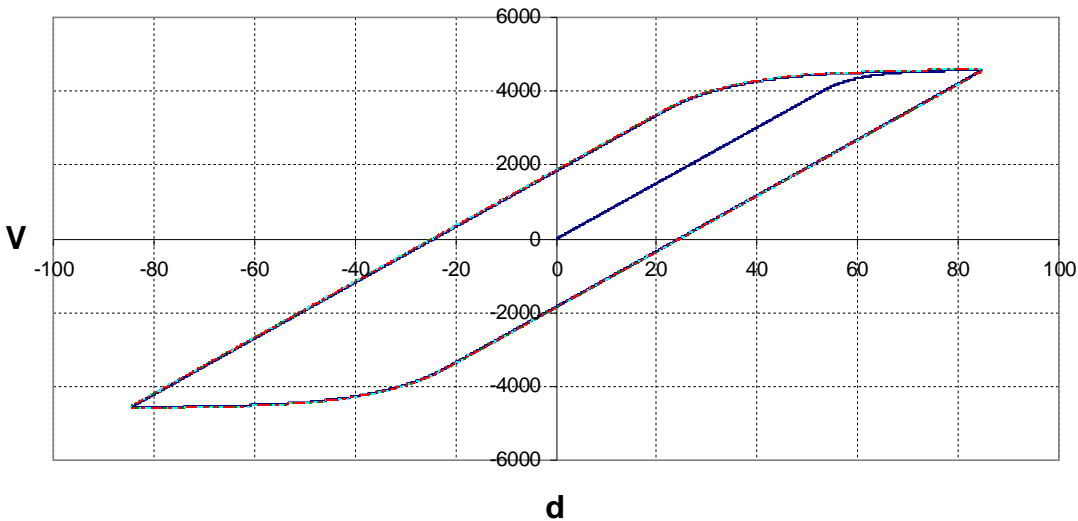
**T40C0Y0L706 (Lp1)**



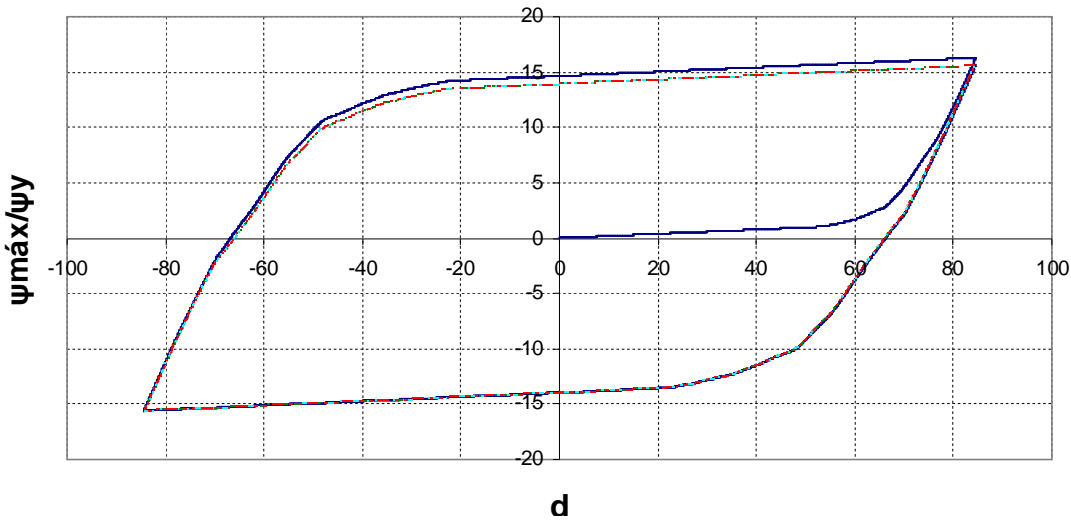
**T40C0Y0L706 (Lp2)**



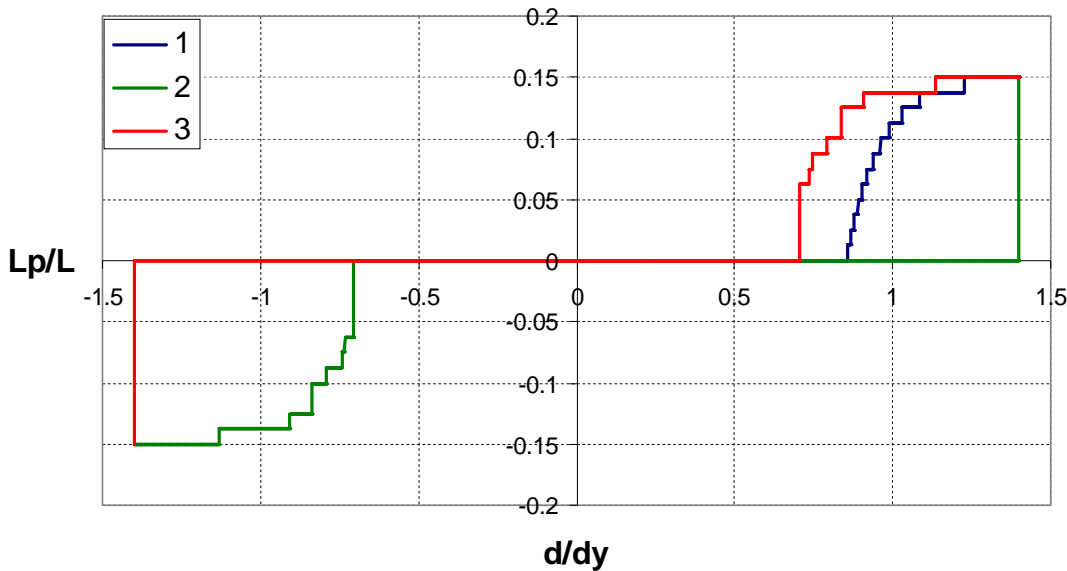
T40C0Y0L1580



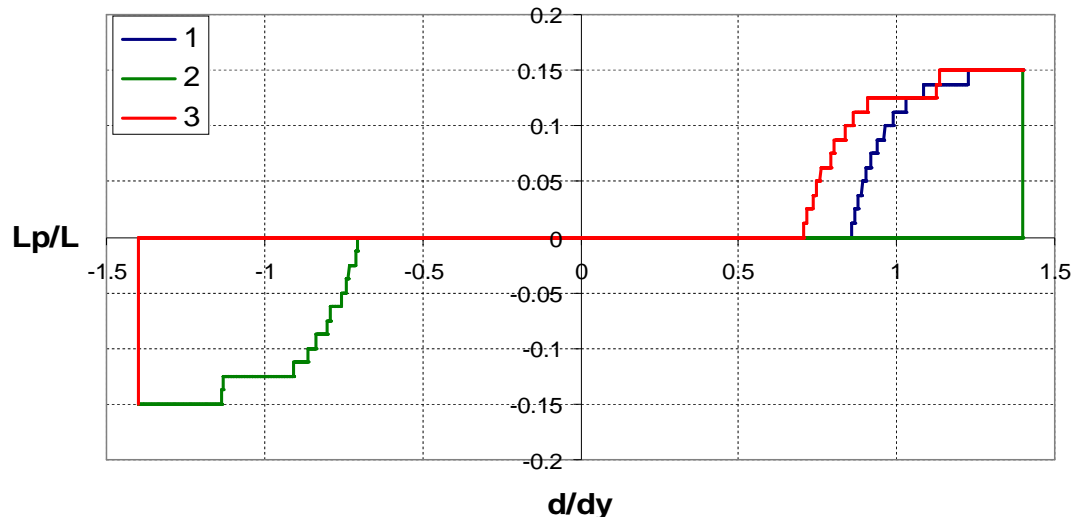
T40C0Y0L1580



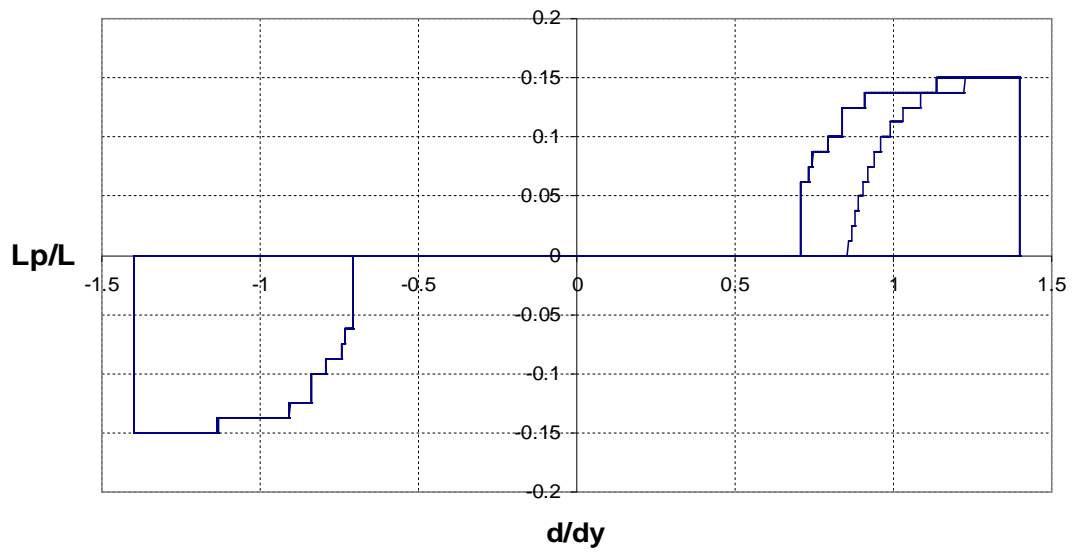
T40C0Y0L1580 (Lp1)



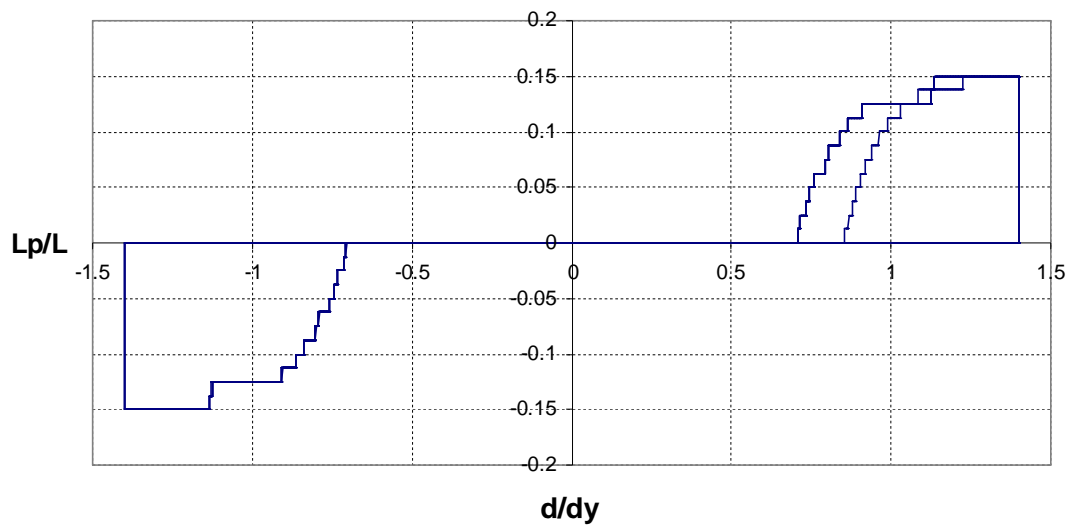
**T40C0Y0L1580 (Lp2)**



**T40C0Y0L1580 (Lp1)**



**T40C0Y0L1580 (Lp2)**

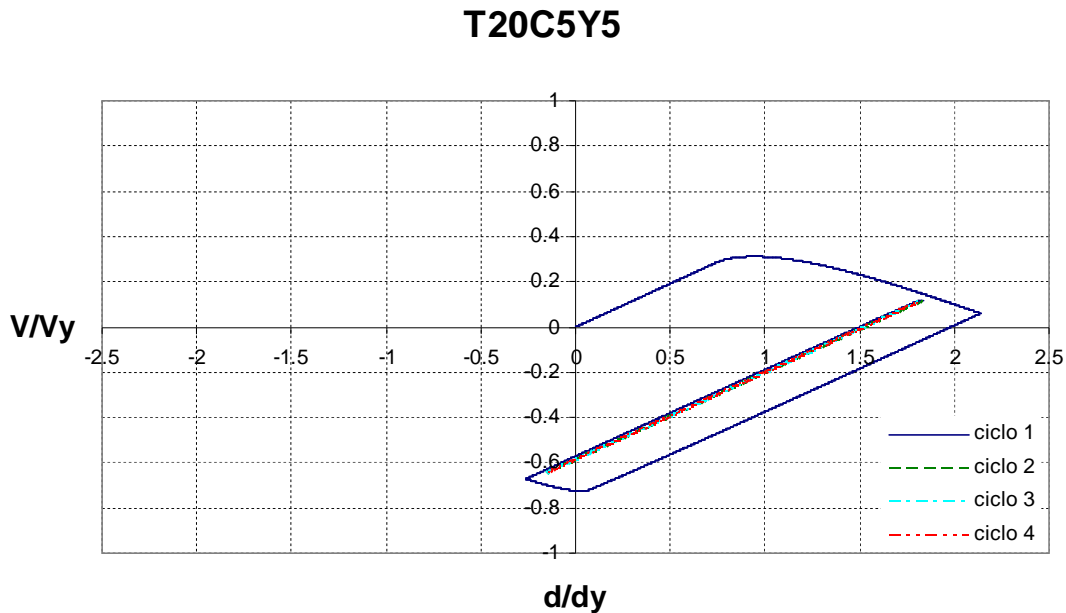


#### 4.3.2 Columnas T20 y T40, $5\varepsilon_y$

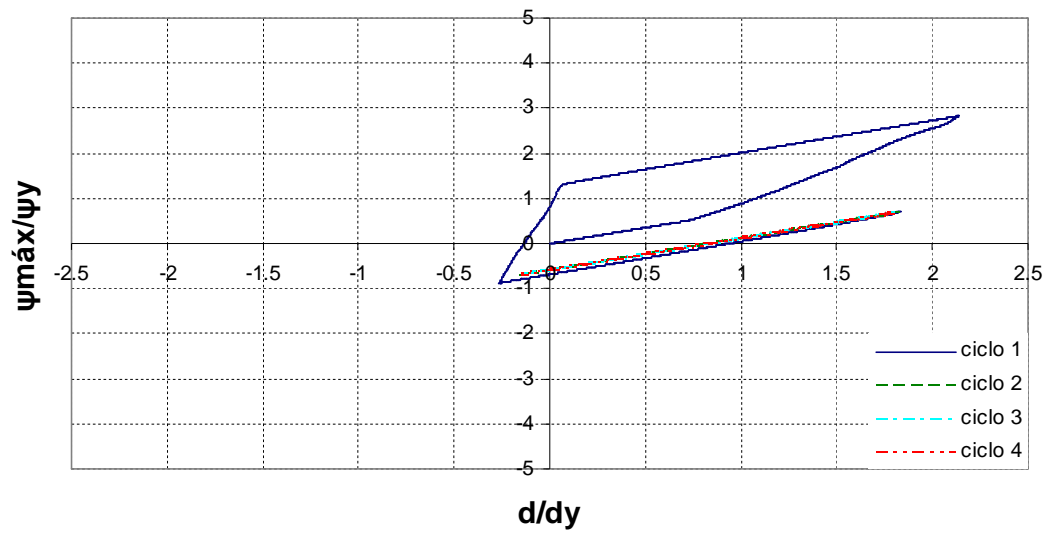
La carga cíclica que se utilizó para este análisis fue mediante un control de desplazamiento, el cual se llevó a cabo hasta llegar a una relación de 5 veces la deformación unitaria de fluencia  $\varepsilon_y$ .

De dichos análisis se obtuvieron graficas cortante,  $V$ , contra desplazamiento lateral  $d$ ; graficas de curvatura máxima,  $\Psi$ , normalizada con la curvatura de fluencia,  $\Psi_y$  contra desplazamiento lateral  $d$ ; y graficas de longitud plástica  $L_p/L$ , contra el desplazamiento lateral normalizado con respecto al desplazamiento de fluencia,  $d_y^*$ , definido aquí como el desplazamiento asociado a la intersección de dos rectas, una con la pendiente de la parte lineal y la segunda con pendiente nula asociada a la plasticidad total.

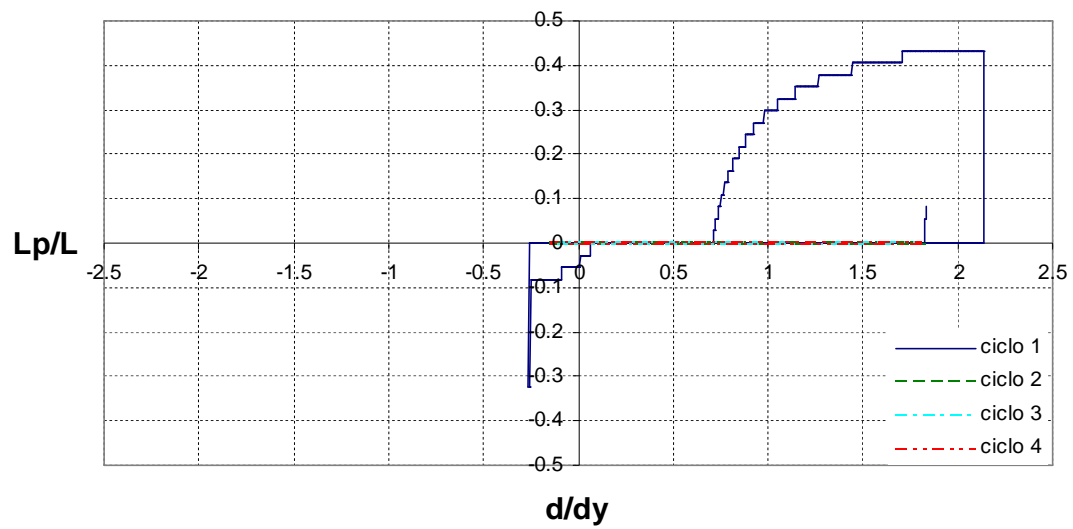
Se puede observar que el comportamiento en los ciclos de dichas columnas es muy inestable debido a que el elemento alcanzo a plastificarse, y para relaciones de carga de fluencia,  $P_y$ , muy grandes la plastificación se presento en los primeros ciclos.



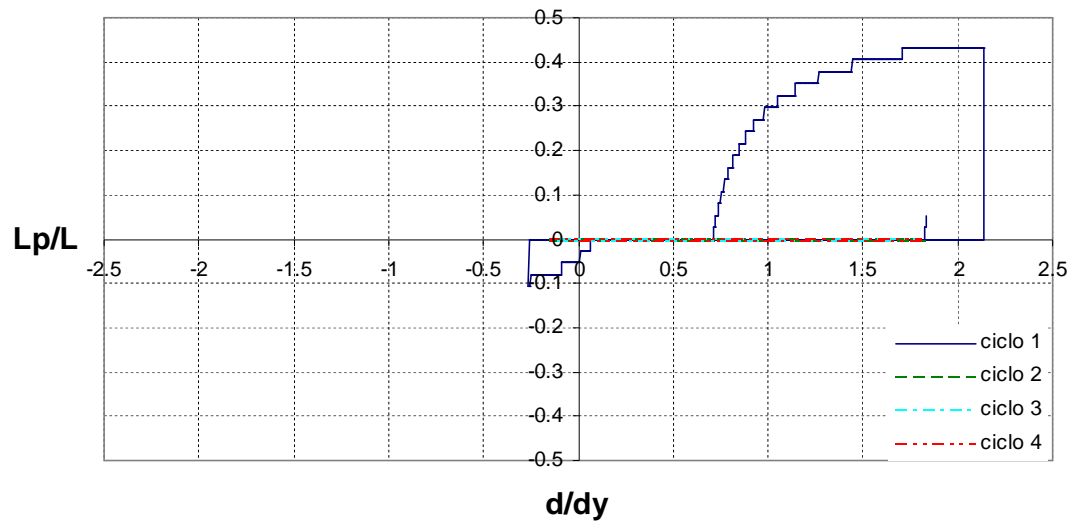
### T20C5Y5



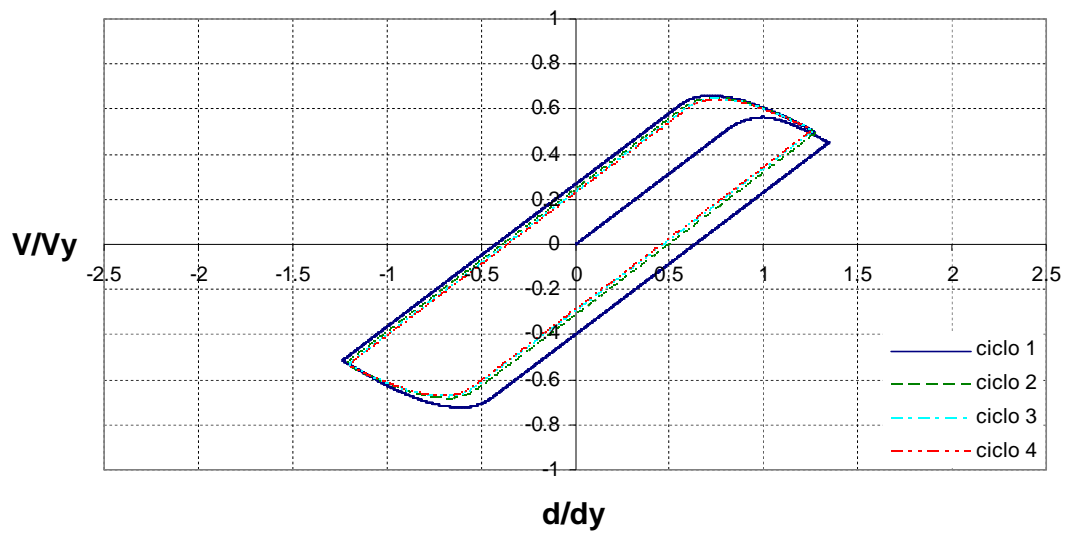
### T20C5Y5 (Lp1)



### T20C5Y5 (Lp2)

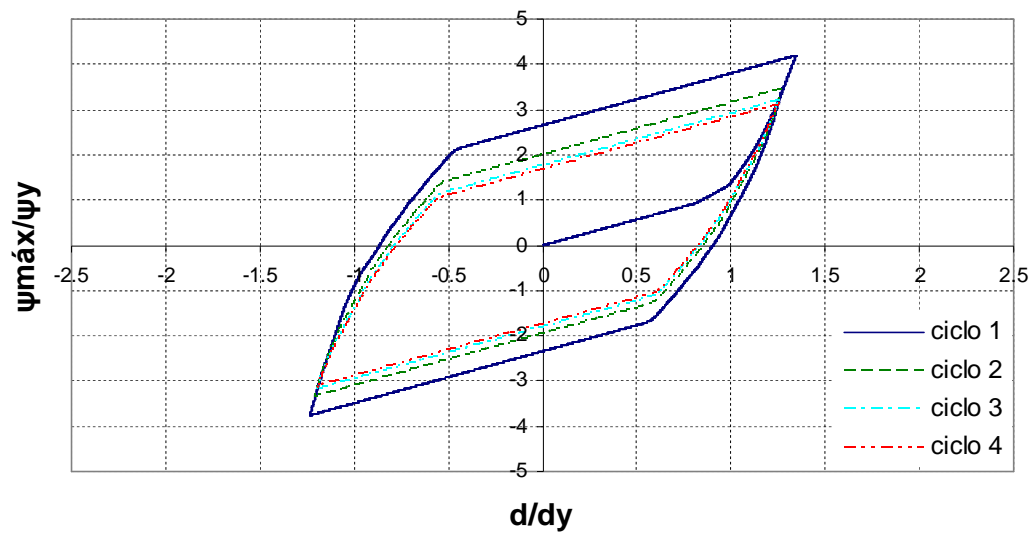


### T20C5Y1

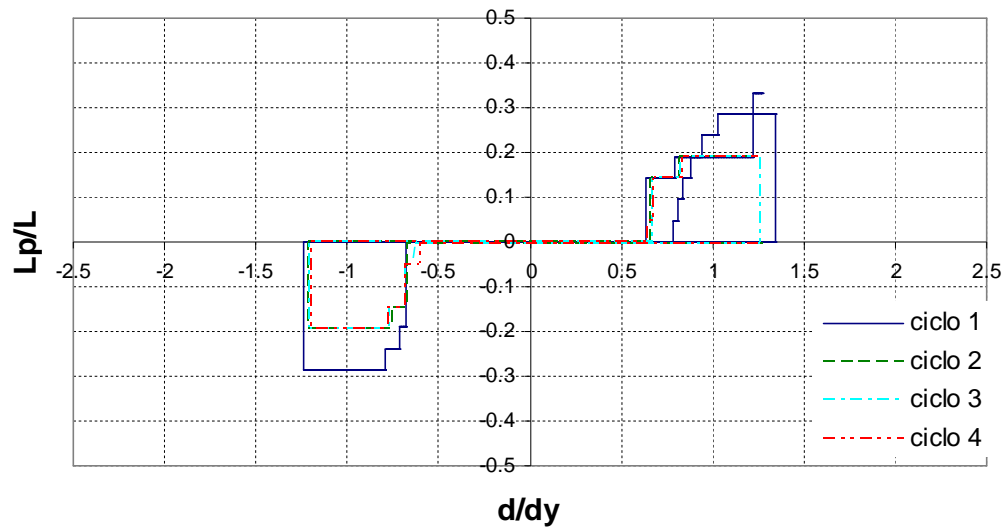




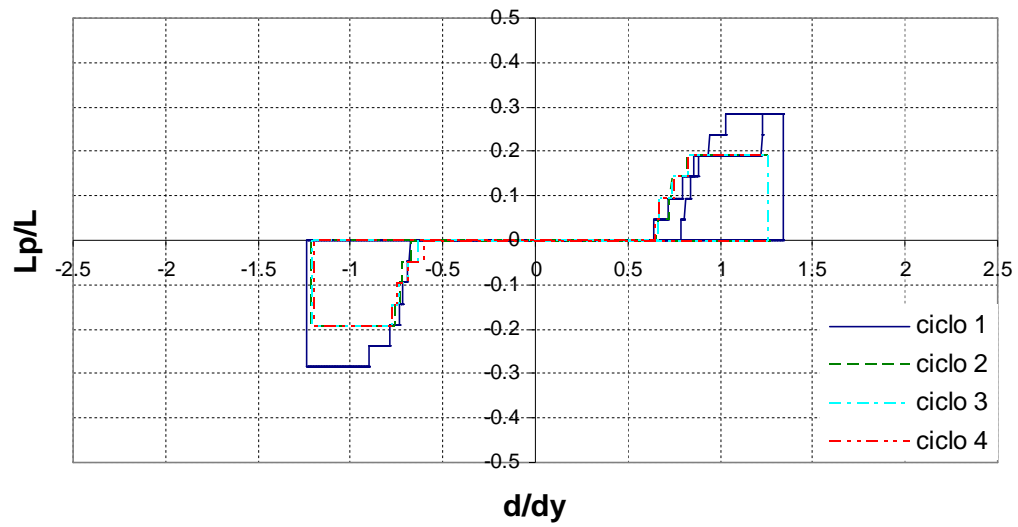
### T20C5Y1



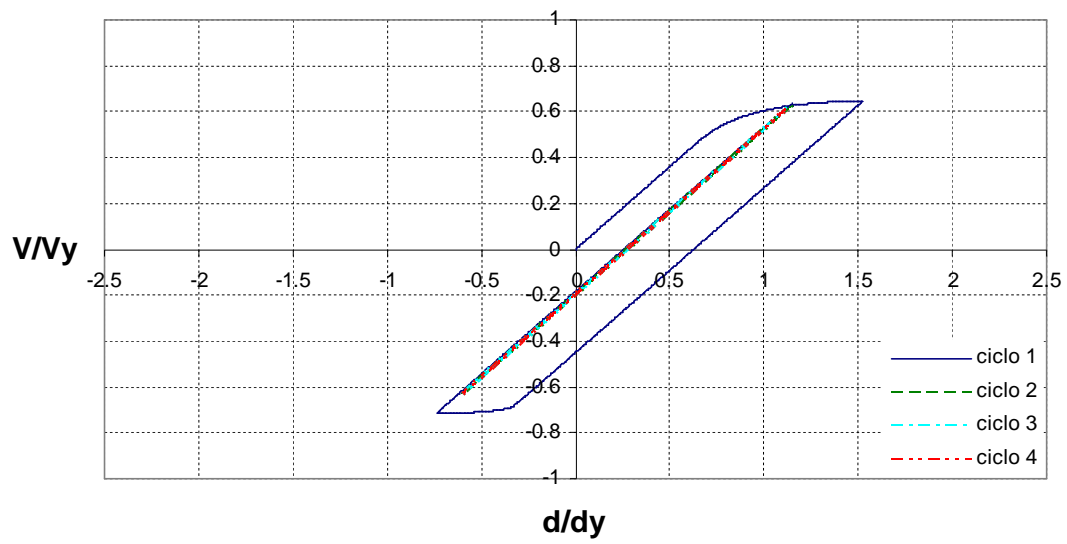
### T20C5Y1 (Lp1)



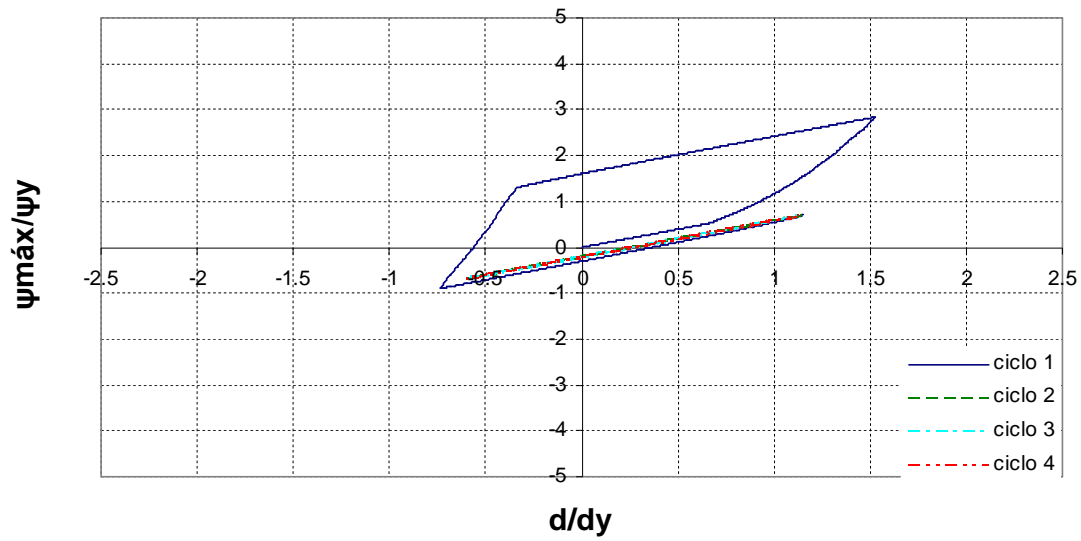
### T20C5Y1 (Lp2)



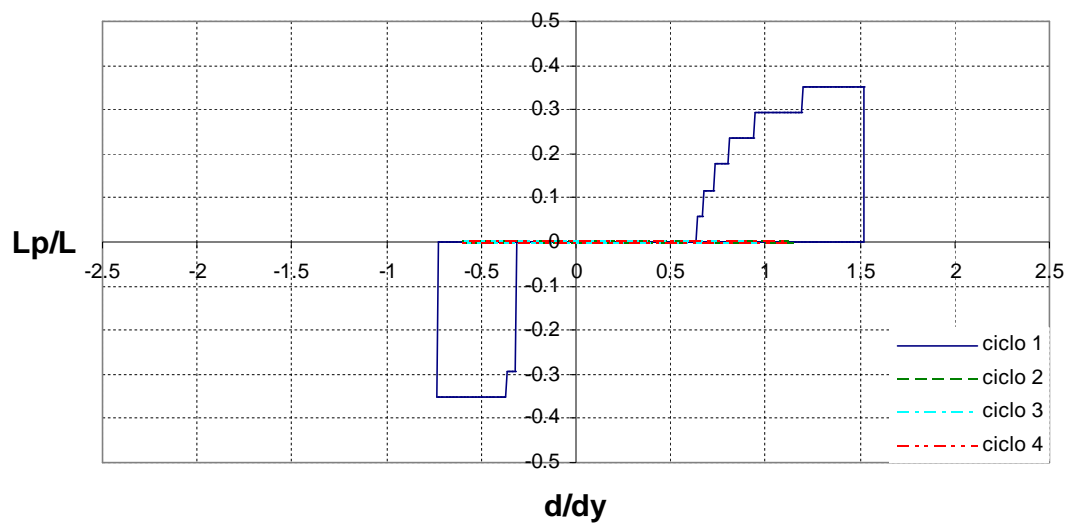
### T20C1Y5



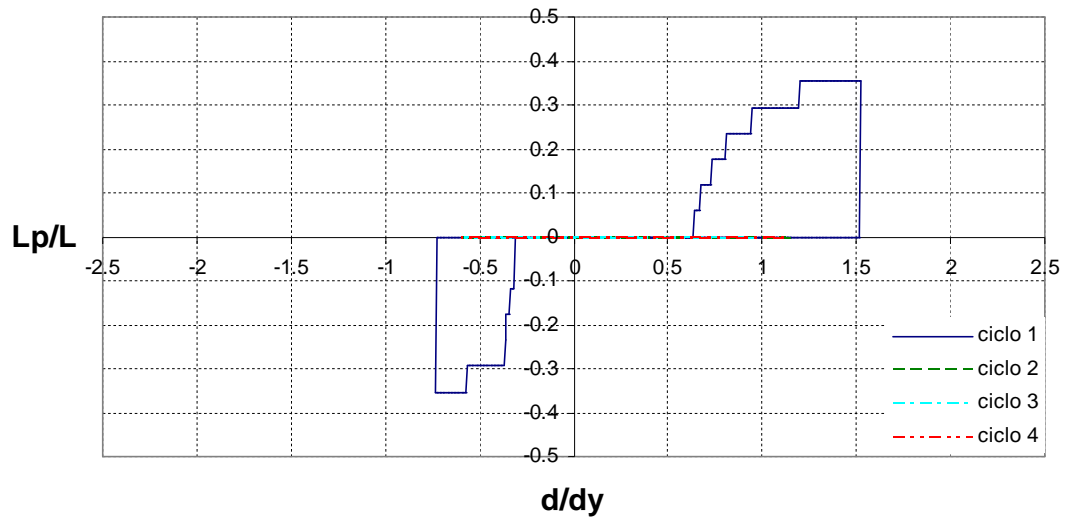
### T20C1Y5



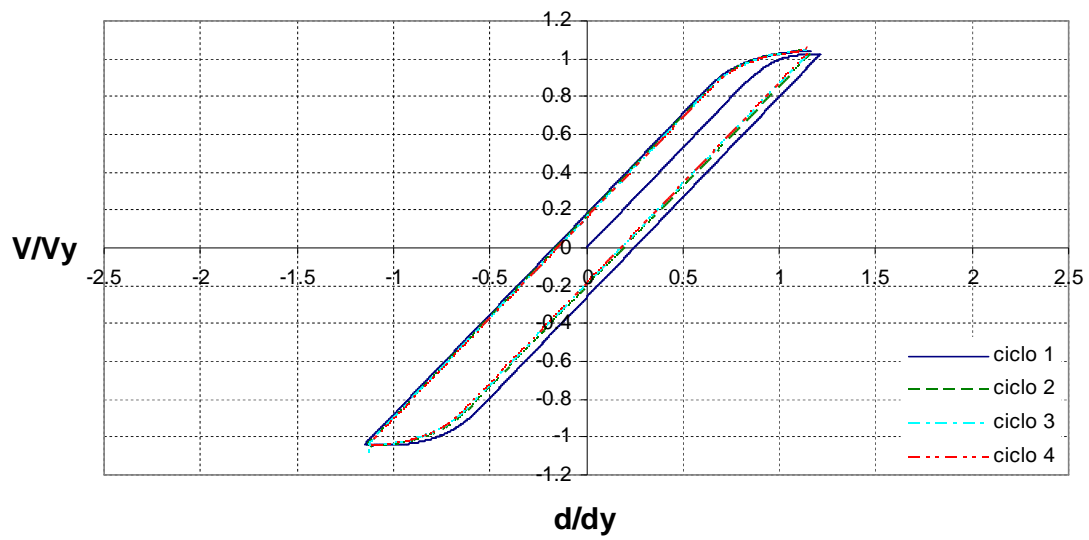
### T20C1Y5 (Lp1)



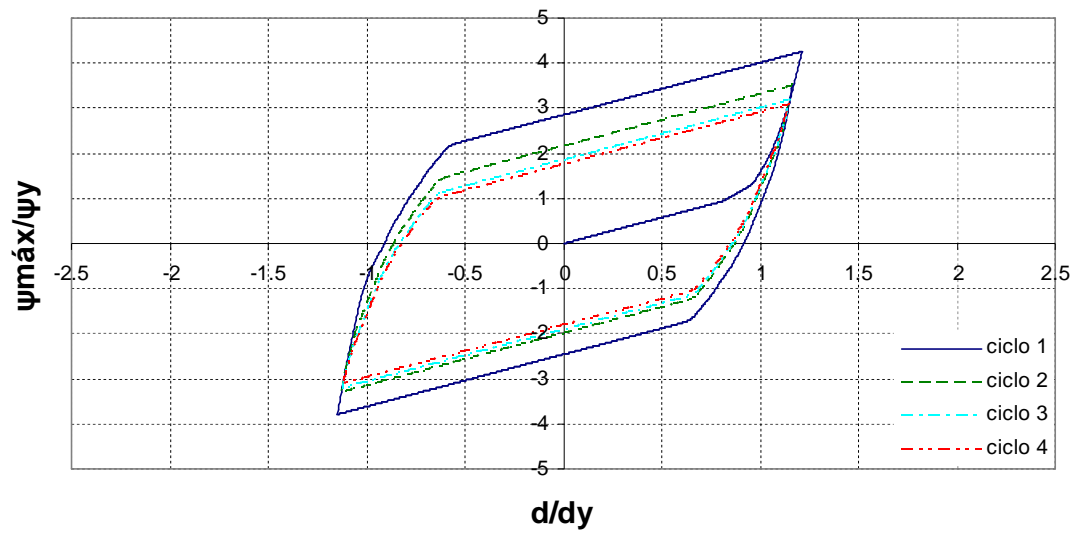
### T20C1Y5 (Lp2)



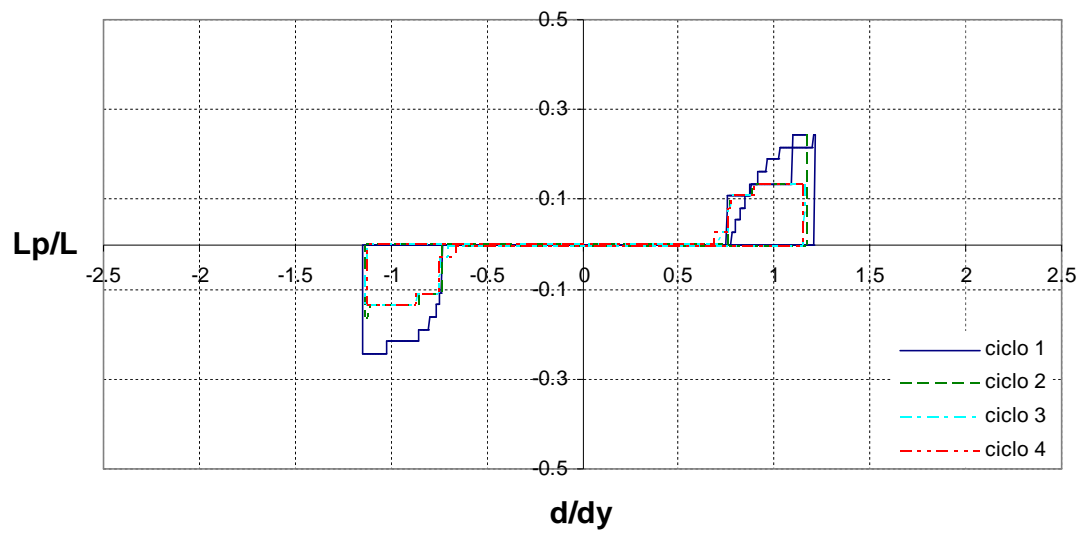
### T20C1Y1



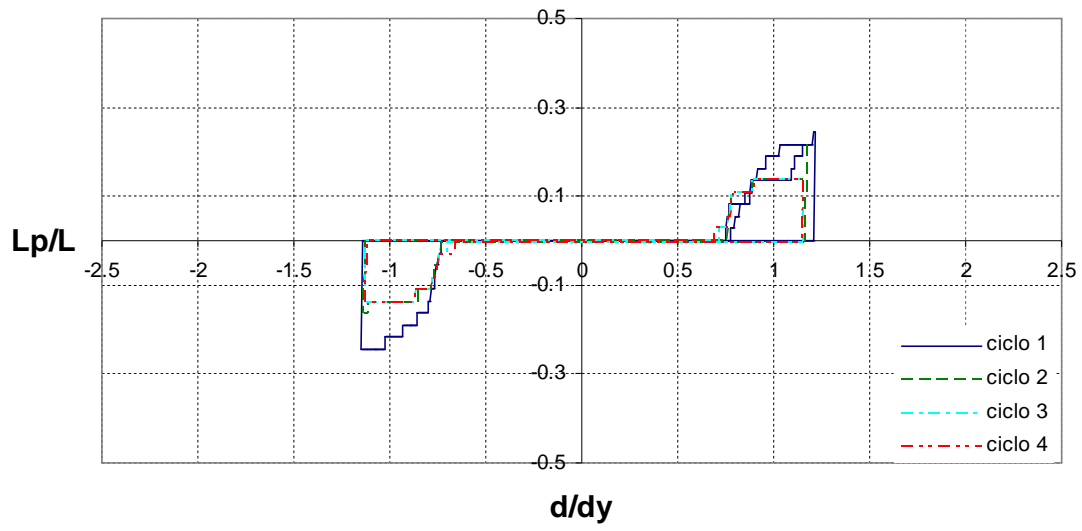
### T20C1Y1



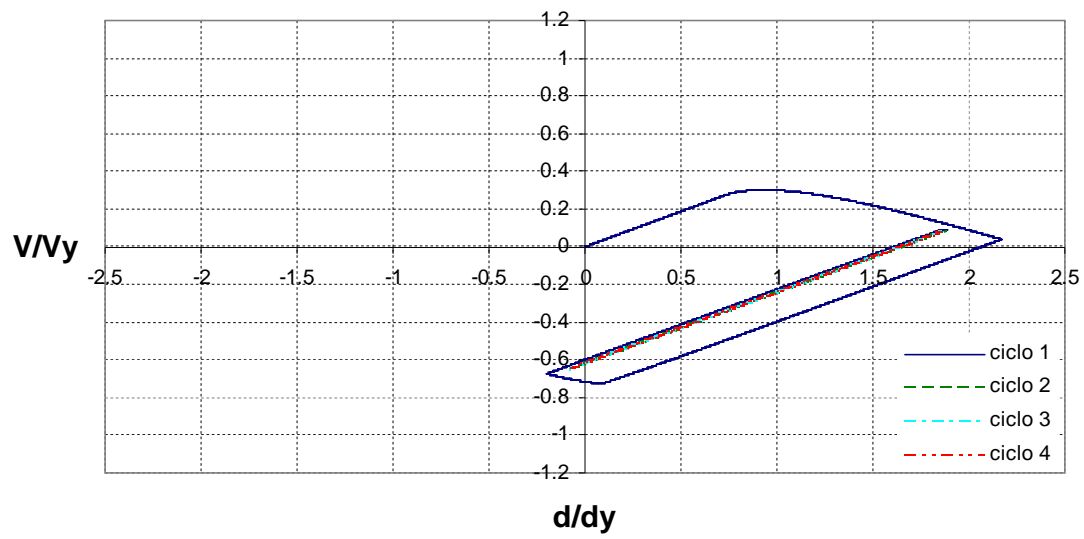
### T20C1Y1 (Lp1)



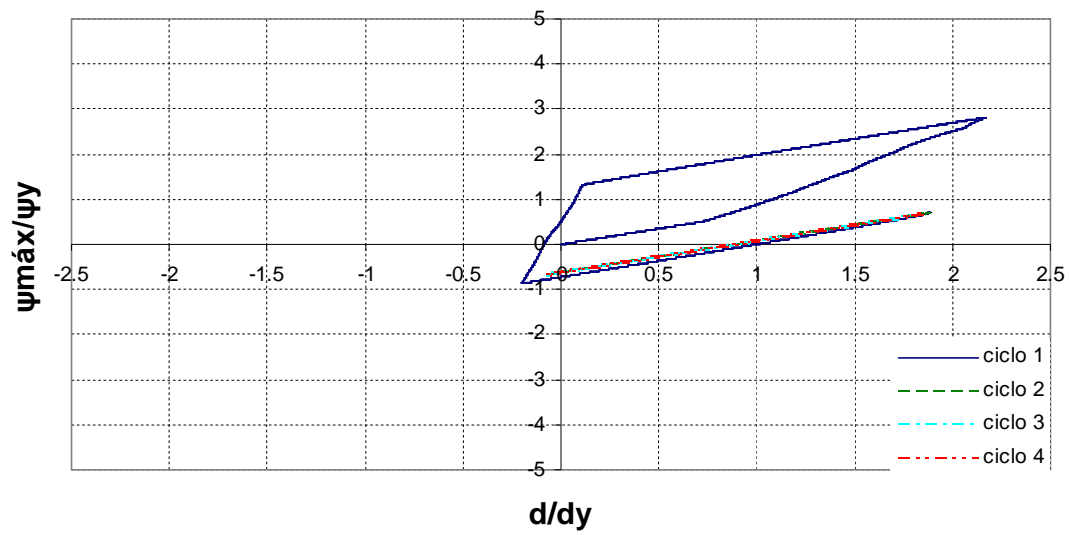
T20C1Y1 (Lp2)



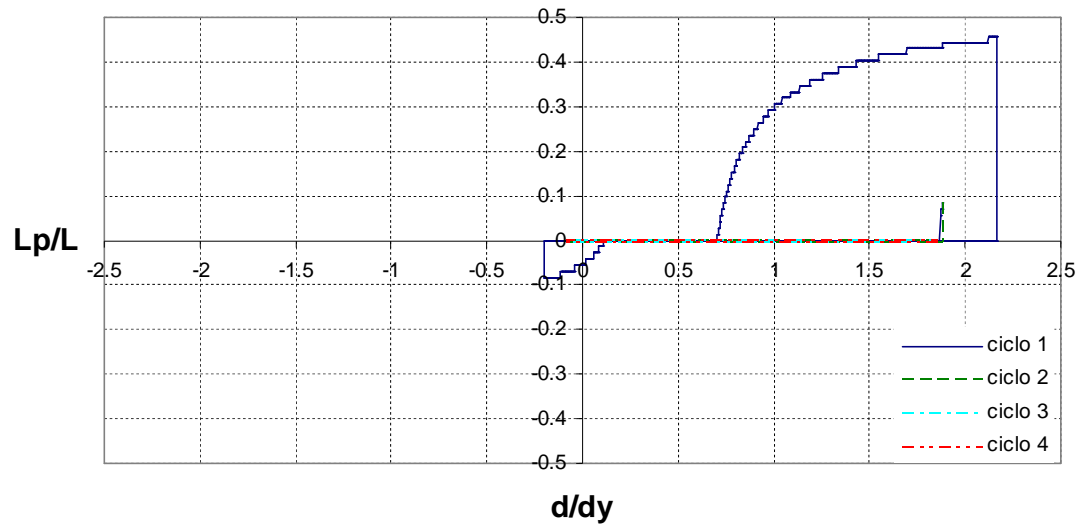
### T40C5Y5



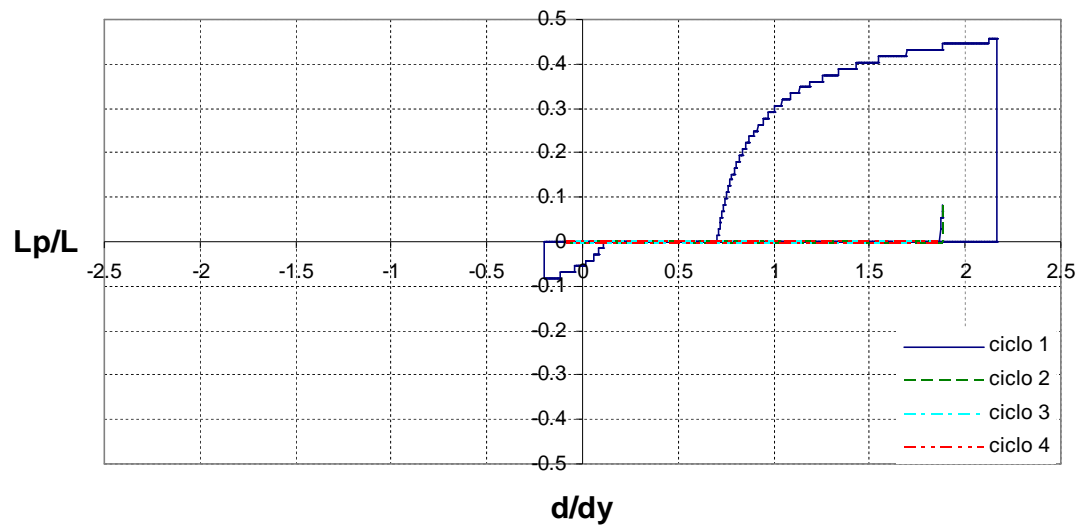
### T40C5Y5



### T40C5Y5 (Lp1)

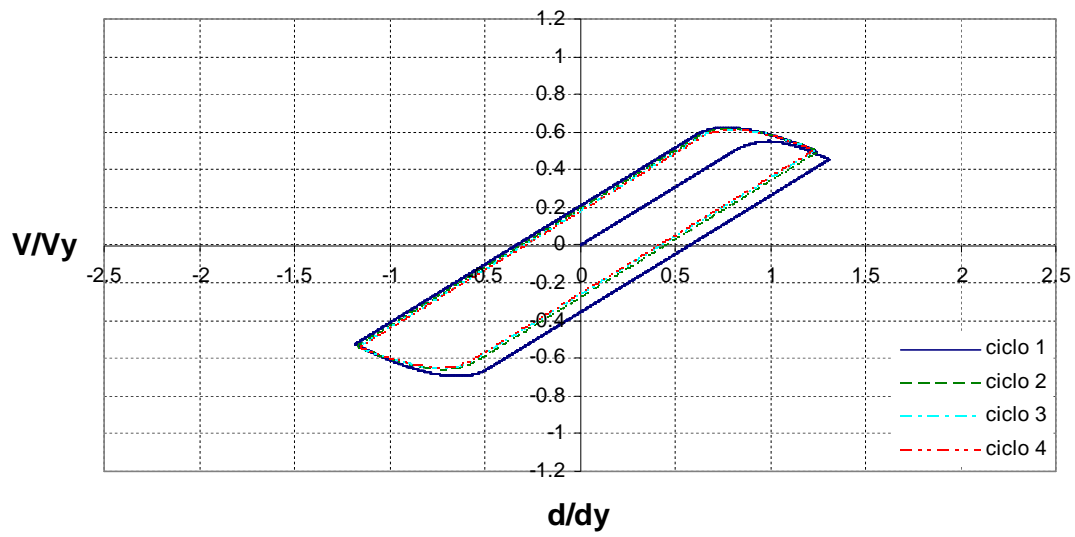


### T40C5Y5 (Lp2)

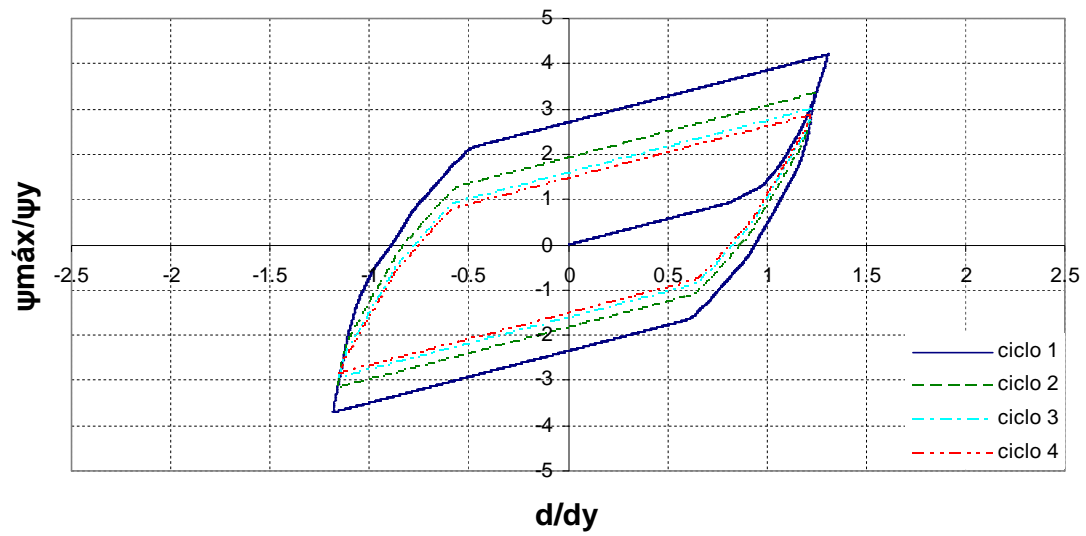




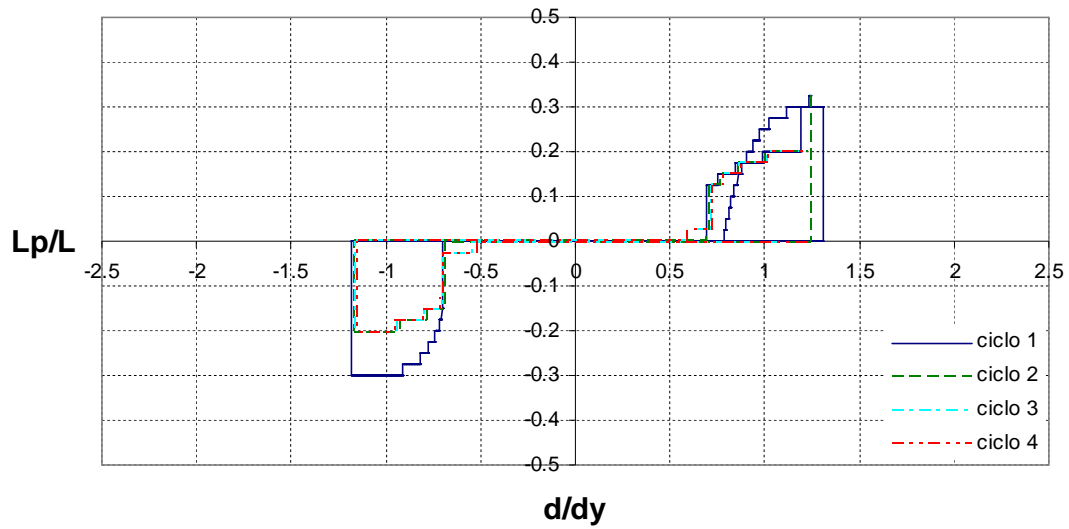
### T40C5Y1



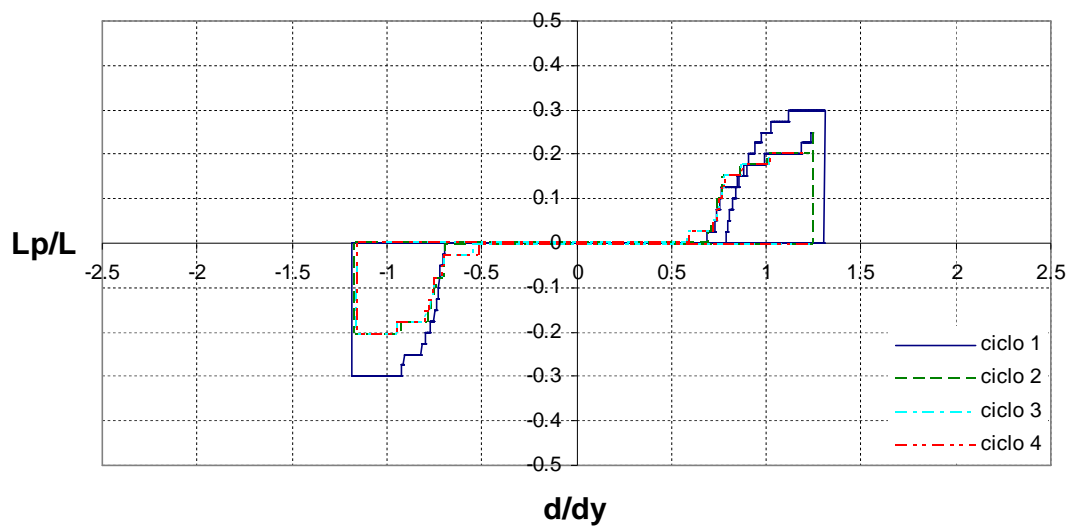
### T40C5Y1



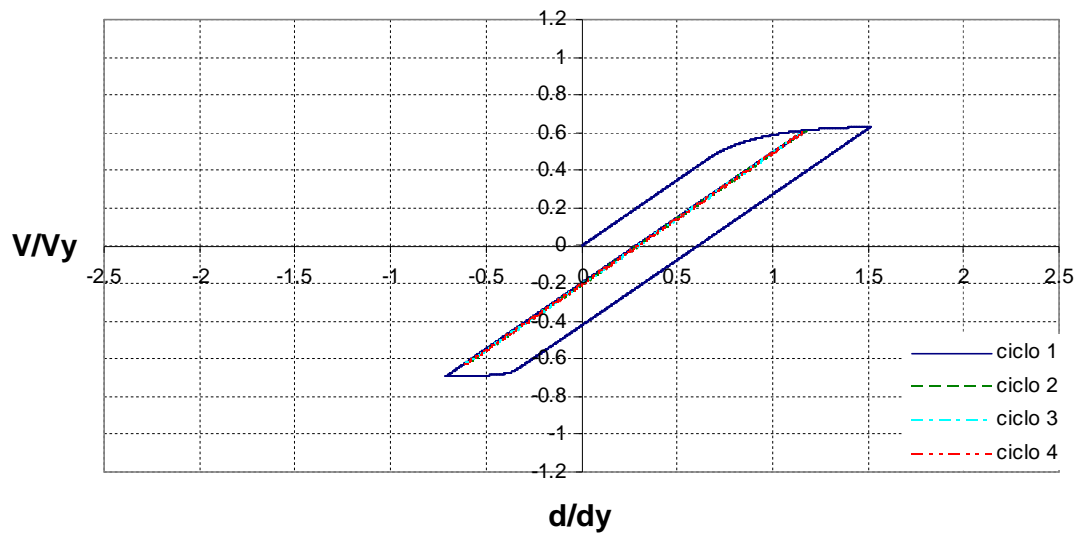
### T40C5Y1 (Lp1)



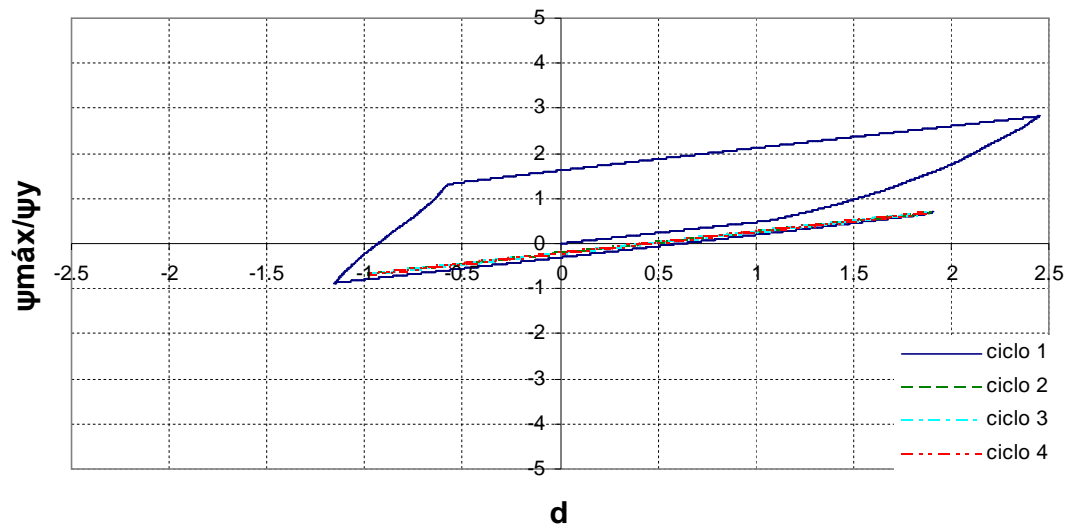
### T40C5Y1 (Lp2)



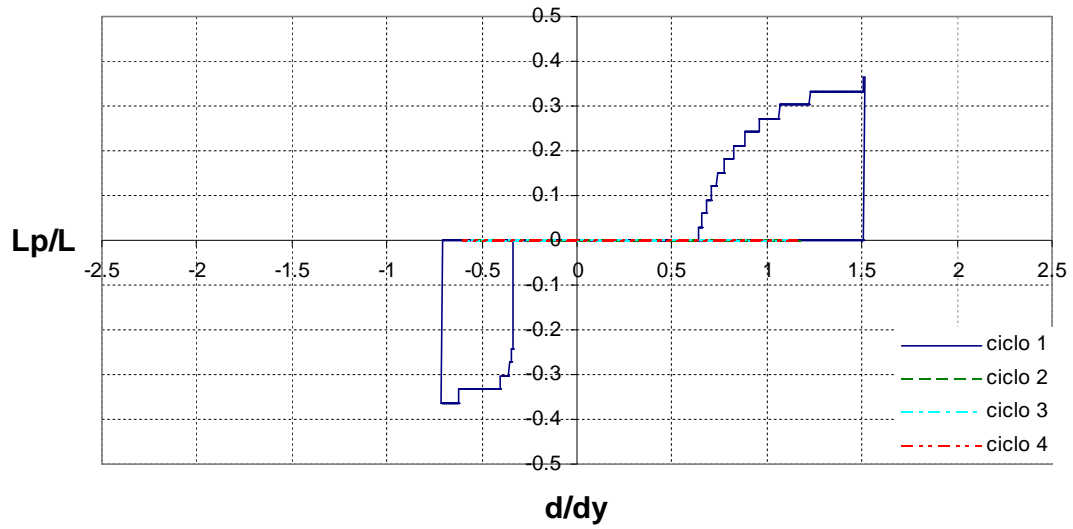
T40C1Y5



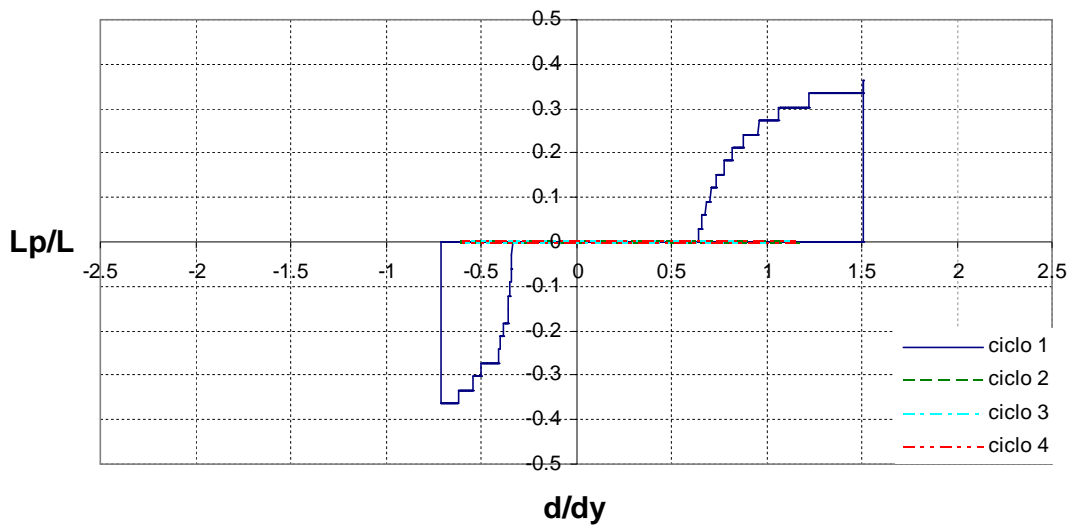
T40C1Y5



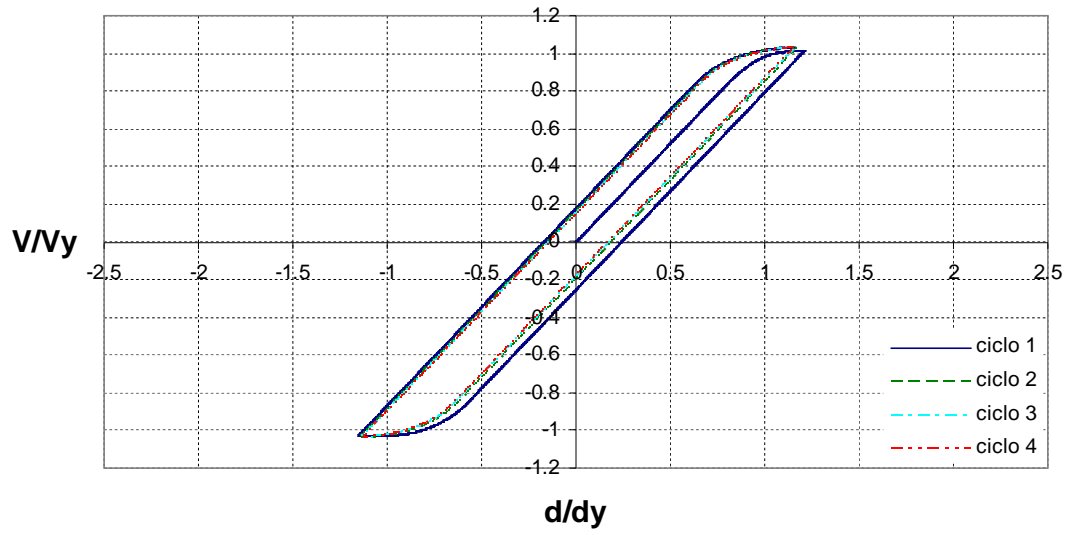
### T40C1Y5 (Lp1)



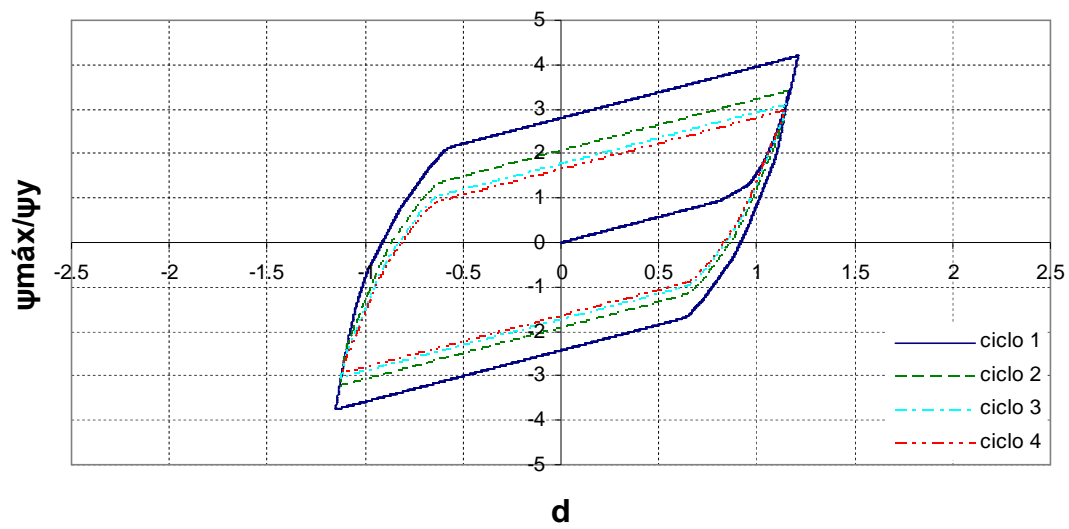
### T40C1Y5 (Lp2)



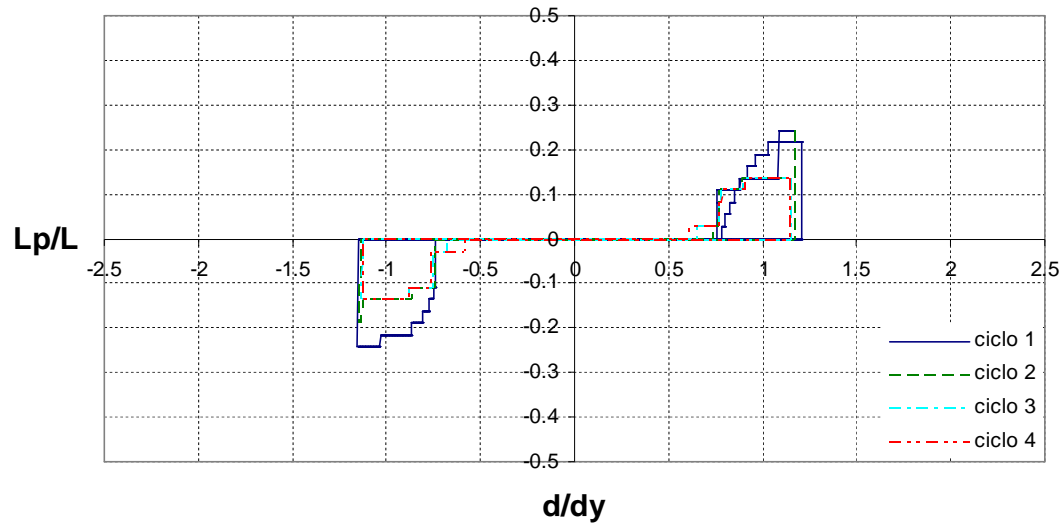
**T40C1Y1**



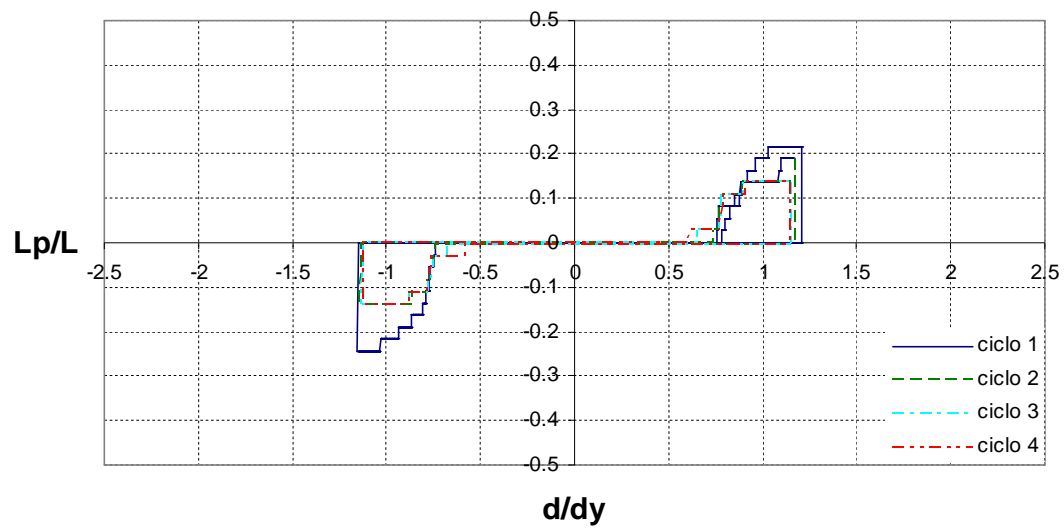
**T40C1Y1**



T40C1Y1 (Lp1)



T40C1Y1 (Lp2)



## Capítulo 4. Análisis de columnas ante carga cíclica

### 4.3.3 Longitud de plasticidad

Es el tramo de la columna en el cual se presenta algún grado de plastificación en la sección transversal, en las columnas de sección cajón, podemos ver que existe una diferencia aproximadamente del triple en la longitud de plasticidad en las columnas con y sin carga axial.

#### Columnas T20, $d/d_y=1.4$

Columna	Carga axial, P (kg)	P/P <sub>cr</sub>	P/P <sub>y</sub>	Longitud (cm)	Lp1/L ciclo 1 A (+)	Lp1/L ciclo 1 B (+)	Lp1/L ciclo 1 A (-)	Lp1/L ciclo 1 B (-)	Lp1/L ciclo 1 A (+)	Lp1/L ciclo 1 B (+)	Lp1/L ciclo 2 A (-)	Lp1/L ciclo 2 B (-)	Lp1/L ciclo 2 A (+)	Lp1/L ciclo 2 B (+)	Lp1/L ciclo 3 A (-)	Lp1/L ciclo 3 B (-)	Lp1/L ciclo 3 A (+)	Lp1/L ciclo 3 B (+)	Lp1/L ciclo 4 A (-)	Lp1/L ciclo 4 B (-)	Lp1/L ciclo 4 A (+)	Lp1/L ciclo 4 B (+)
T20C5Y5	62000	0.5	0.5	355	0.00	0.37	0.42	0.00	0.00	0.42	0.14	0.00	0.00	0.42	0.14	0.00	0.00	0.42	0.14	0.00	0.00	0.42
T20C5Y1	12400	0.5	0.1	790	0.15	0.25	0.30	0.10	0.10	0.30	0.30	0.10	0.10	0.30	0.30	0.10	0.10	0.20	0.20	0.10	0.10	0.20
T20C1Y5	62000	0.1	0.5	160	0.00	0.31	0.31	0.00	0.00	0.31	0.19	0.00	0.00	0.31	0.13	0.00	0.00	0.06	0.13	0.00	0.00	0.06
T20C1Y1	12400	0.1	0.1	355	0.08	0.23	0.23	0.06	0.06	0.23	0.23	0.06	0.06	0.14	0.14	0.06	0.06	0.14	0.14	0.06	0.06	0.14
T20C0Y0L160	0	0	0	160	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
T20C0Y0L355	0	0	0	355	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
T20C0Y0L790	0	0	0	790	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14

Columna	Carga axial, P (kg)	P/P <sub>cr</sub>	P/P <sub>y</sub>	Longitud (cm)	Lp2/L ciclo 1 A (+)	Lp2/L ciclo 1 B (+)	Lp2/L ciclo 1 A (-)	Lp2/L ciclo 1 B (-)	Lp2/L ciclo 1 A (+)	Lp2/L ciclo 1 B (+)	Lp2/L ciclo 2 A (-)	Lp2/L ciclo 2 B (-)	Lp2/L ciclo 2 A (+)	Lp2/L ciclo 2 B (+)	Lp2/L ciclo 3 A (-)	Lp2/L ciclo 3 B (-)	Lp2/L ciclo 3 A (+)	Lp2/L ciclo 3 B (+)	Lp2/L ciclo 4 A (-)	Lp2/L ciclo 4 B (-)	Lp2/L ciclo 4 A (+)	Lp2/L ciclo 4 B (+)
T20C5Y5	62000	0.5	0.5	355	0.00	0.37	0.42	0.00	0.00	0.42	0.00	0.14	0.00	0.42	0.14	0.00	0.00	0.42	0.14	0.00	0.00	0.42
T20C5Y1	12400	0.5	0.1	790	0.15	0.25	0.30	0.10	0.10	0.30	0.30	0.10	0.10	0.30	0.30	0.10	0.10	0.20	0.20	0.10	0.10	0.20
T20C1Y5	62000	0.1	0.5	160	0.00	0.31	0.31	0.00	0.00	0.31	0.19	0.00	0.00	0.31	0.13	0.00	0.00	0.06	0.13	0.00	0.00	0.06
T20C1Y1	12400	0.1	0.1	355	0.08	0.23	0.23	0.06	0.06	0.23	0.23	0.06	0.06	0.14	0.14	0.06	0.06	0.14	0.14	0.06	0.06	0.14
T20C0Y0L160	0	0	0	160	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
T20C0Y0L355	0	0	0	355	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
T20C0Y0L790	0	0	0	790	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14

## Capítulo 4. Análisis de columnas ante carga cíclica

### Columnas T40, $d/d_y=1.4$

Columna	Carga axial, P (kg)	P/P <sub>cr</sub>	P/Py	Longitud (cm)	Lp1/L ciclo 1 A (+)	Lp1/L ciclo 1 B (+)	Lp1/L ciclo 1 A (-)	Lp1/L ciclo 1 B (-)	Lp1/L ciclo 1 A (+)	Lp1/L ciclo 1 B (+)	Lp1/L ciclo 2 A (-)	Lp1/L ciclo 2 B (-)	Lp1/L ciclo 2 A (+)	Lp1/L ciclo 2 B (+)	Lp1/L ciclo 3 A (-)	Lp1/L ciclo 3 B (-)
T40C5Y5	250000	0.5	0.5	706	0.00	0.38	0.44	0.00	0.00	0.44	0.14	0.00	0.00	0.44	0.14	0.00
T40C5Y1	49600	0.5	0.1	1580	0.15	0.30	0.30	0.08	0.10	0.30	0.30	0.08	0.10	0.18	0.18	0.08
T40C1Y5	250000	0.1	0.5	316	0.00	0.32	0.35	0.00	0.00	0.35	0.19	0.00	0.00	0.35	0.16	0.00
T40C1Y1	49600	0.1	0.1	706	0.08	0.23	0.23	0.06	0.06	0.23	0.23	0.06	0.06	0.14	0.14	0.06
T40C0Y0L316	0	0	0	316	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
T40C0Y0L706	0	0	0	706	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
T40C0Y0L1580	0	0	0	1580	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14

Columna	Carga axial, P (kg)	P/P <sub>cr</sub>	P/Py	Longitud (cm)	Lp2/L ciclo 1 A (+)	Lp2/L ciclo 1 B (+)	Lp2/L ciclo 1 A (-)	Lp2/L ciclo 1 B (-)	Lp2/L ciclo 1 A (+)	Lp2/L ciclo 1 B (+)	Lp2/L ciclo 2 A (-)	Lp2/L ciclo 2 B (-)	Lp2/L ciclo 2 A (+)	Lp2/L ciclo 2 B (+)	Lp2/L ciclo 3 A (-)	Lp2/L ciclo 3 B (-)
T40C5Y5	250000	0.5	0.5	706	0.00	0.38	0.44	0.00	0.00	0.44	0.14	0.00	0.00	0.44	0.14	0.00
T40C5Y1	49600	0.5	0.1	1580	0.15	0.30	0.30	0.08	0.10	0.30	0.30	0.08	0.10	0.18	0.18	0.08
T40C1Y5	250000	0.1	0.5	316	0.00	0.32	0.35	0.00	0.00	0.35	0.19	0.00	0.00	0.35	0.16	0.00
T40C1Y1	49600	0.1	0.1	706	0.08	0.23	0.23	0.06	0.06	0.23	0.23	0.06	0.06	0.14	0.14	0.06
T40C0Y0L316	0	0	0	316	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
T40C0Y0L706	0	0	0	706	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
T40C0Y0L1580	0	0	0	1580	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14



Columnas T20,  $5\varepsilon_y$

Columna	Carga axial, P (kg)	P/P <sub>cr</sub>	P/Py	Longitud (cm)	Lp1/L ciclo 1 A (+)	Lp1/L ciclo 1 B (+)	Lp1/L ciclo 1 A (-)	Lp1/L ciclo 1 B (-)	Lp1/L ciclo 1 A (+)	Lp1/L ciclo 1 B (+)	Lp1/L ciclo 2 A (-)	Lp1/L ciclo 2 B (-)	Lp1/L ciclo 2 A (+)	Lp1/L ciclo 2 B (+)	Lp1/L ciclo 3 A (-)	Lp1/L ciclo 3 B (-)	Lp1/L ciclo 3 A (+)	Lp1/L ciclo 3 B (+)
T20C5Y5	62000	0.5	0.5	355	0.00	0.42	0.31	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T20C5Y1	12400	0.5	0.1	790	0.10	0.25	0.25	0.05	0.10	0.30	0.15	0.05	0.10	0.15	0.15	0.05	0.05	0.05
T20C1Y5	62000	0.1	0.5	160	0.00	0.31	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T20C1Y1	12400	0.1	0.1	355	0.08	0.23	0.23	0.06	0.06	0.23	0.14	0.06	0.06	0.11	0.11	0.06	0.06	0.06
T20C0Y0L160	0	0	0	160	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
T20C0Y0L355	0	0	0	355	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
T20C0Y0L790	0	0	0	790	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13

Columna	Carga axial, P (kg)	P/P <sub>cr</sub>	P/Py	Longitud (cm)	Lp2/L ciclo 1 A (+)	Lp2/L ciclo 1 B (+)	Lp2/L ciclo 1 A (-)	Lp2/L ciclo 1 B (-)	Lp2/L ciclo 1 A (+)	Lp2/L ciclo 1 B (+)	Lp2/L ciclo 2 A (-)	Lp2/L ciclo 2 B (-)	Lp2/L ciclo 2 A (+)	Lp2/L ciclo 2 B (+)	Lp2/L ciclo 3 A (-)	Lp2/L ciclo 3 B (-)	Lp2/L ciclo 3 A (+)	Lp2/L ciclo 3 B (+)
T20C5Y5	62000	0.5	0.5	355	0.00	0.42	0.08	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T20C5Y1	12400	0.5	0.1	790	0.10	0.25	0.25	0.05	0.10	0.25	0.15	0.05	0.10	0.15	0.15	0.05	0.05	0.05
T20C1Y5	62000	0.1	0.5	160	0.00	0.31	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T20C1Y1	12400	0.1	0.1	355	0.08	0.23	0.23	0.06	0.06	0.20	0.14	0.06	0.06	0.11	0.11	0.06	0.06	0.06
T20C0Y0L160	0	0	0	160	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
T20C0Y0L355	0	0	0	355	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
T20C0Y0L790	0	0	0	790	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13

## Capítulo 4. Análisis de columnas ante carga cíclica

### Columnas T40, $5\varepsilon_y$

Columna	Carga axial, P (kg)	P/P <sub>cr</sub>	P/Py	Longitud (cm)	Lp1/L ciclo 1 A (+)	Lp1/L ciclo 1 B (+)	Lp1/L ciclo 1 A (-)	Lp1/L ciclo 1 B (-)	Lp1/L ciclo 1 A (+)	Lp1/L ciclo 1 B (+)	Lp1/L ciclo 2 A (-)	Lp1/L ciclo 2 B (-)	Lp1/L ciclo 2 A (+)	Lp1/L ciclo 2 B (+)	Lp1/L ciclo 3 A (-)	Lp1/L ciclo 3 B (-)
T40C5Y5	250000	0.5	0.5	706	0.00	0.45	0.07	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T40C5Y1	49600	0.5	0.1	1580	0.13	0.28	0.28	0.08	0.10	0.28	0.18	0.08	0.10	0.18	0.18	0.08
T40C1Y5	250000	0.1	0.5	316	0.00	0.35	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T40C1Y1	49600	0.1	0.1	706	0.08	0.20	0.23	0.06	0.06	0.23	0.17	0.06	0.06	0.11	0.11	0.06
T40C0Y0L316	0	0	0	316	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
T40C0Y0L706	0	0	0	706	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
T40C0Y0L1580	0	0	0	1580	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13

Columna	Carga axial, P (kg)	P/P <sub>cr</sub>	P/Py	Longitud (cm)	Lp2/L ciclo 1 A (+)	Lp2/L ciclo 1 B (+)	Lp2/L ciclo 1 A (-)	Lp2/L ciclo 1 B (-)	Lp2/L ciclo 1 A (+)	Lp2/L ciclo 1 B (+)	Lp2/L ciclo 2 A (-)	Lp2/L ciclo 2 B (-)	Lp2/L ciclo 2 A (+)	Lp2/L ciclo 2 B (+)	Lp2/L ciclo 3 A (-)	Lp2/L ciclo 3 B (-)
T40C5Y5	250000	0.5	0.5	706	0.00	0.45	0.07	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T40C5Y1	49600	0.5	0.1	1580	0.13	0.28	0.28	0.08	0.10	0.23	0.18	0.08	0.10	0.18	0.18	0.05
T40C1Y5	250000	0.1	0.5	316	0.00	0.35	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T40C1Y1	49600	0.1	0.1	706	0.08	0.20	0.23	0.06	0.06	0.17	0.11	0.06	0.06	0.11	0.11	0.06
T40C0Y0L316	0	0	0	316	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
T40C0Y0L706	0	0	0	706	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
T40C0Y0L1580	0	0	0	1580	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13

## 5. ANÁLISIS DE COLUMNAS ANTE CARGA DINÁMICA.

En este capítulo se analiza la distribución de plasticidades en columnas sometidas a la acción de carga dinámica bajo diferentes condiciones de carga axial. Para ello, se realizan simulaciones de elemento finito considerando las no linealidades geométricas y constitutivas asociadas al estudio. Se consideraron los mismos dos modelos de columnas utilizados en los análisis anteriores. También se realizaron simulaciones con el programa DRAIN-2DX para obtener valores de rotaciones

Las columnas definidas se representaron mediante un modelo de elemento finito, en el cual se proporciono la carga lateral mediante el espectro de SCT-85, dicha espectro se escalo de forma incremental en relación a n veces el desplazamiento de fluencia, con el fin de ver el comportamiento de la columna bajo diferentes demandas de desplazamiento.

Columna	Carga axial, P (kg)	P/P <sub>cr</sub>	P/P <sub>y</sub>	Longitud (cm)
T20C5Y5	62000	0.5	0.5	355
T20C5Y3	37300	0.5	0.3	455
T20C5Y1	12400	0.5	0.1	790
T20C3Y5	62000	0.3	0.5	275
T20C3Y3	37300	0.3	0.3	355
T20C3Y1	12400	0.3	0.1	610
T20C1Y5	62000	0.1	0.5	160
T20C1Y3	37300	0.1	0.3	205
T20C1Y1	12400	0.1	0.1	355
T20C0Y0L160	0	0	0	160
T20C0Y0L205	0	0	0	205
T20C0Y0L275	0	0	0	275
T20C0Y0L355	0	0	0	355
T20C0Y0L455	0	0	0	455
T20C0Y0L610	0	0	0	610
T20C0Y0L790	0	0	0	790

*Características de la columna de sección cajón T20.*

## Capítulo 5. Análisis de columnas ante carga dinámica

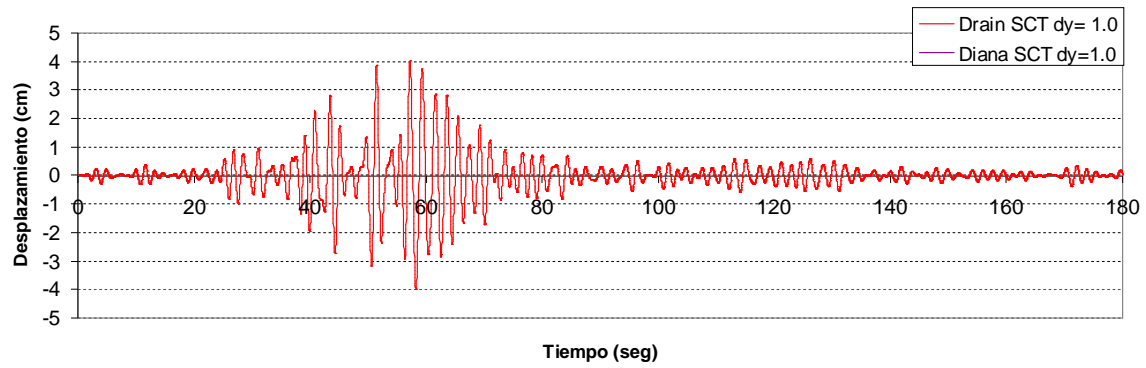
Columna	Carga axial, P (kg)	P/P <sub>cr</sub>	P/P <sub>y</sub>	Longitud (cm)
T40C5Y5	250000	0.5	0.5	706
T40C5Y3	149500	0.5	0.3	910
T40C5Y1	49600	0.5	0.1	1580
T40C3Y5	250000	0.3	0.5	545
T40C3Y3	149500	0.3	0.3	706
T40C3Y1	49600	0.3	0.1	1225
T40C1Y5	250000	0.1	0.5	316
T40C1Y3	149500	0.1	0.3	410
T40C1Y1	49600	0.1	0.1	706
T40C0Y0L316	0	0	0	316
T40C0Y0L410	0	0	0	410
T40C0Y0L545	0	0	0	545
T40C0Y0L706	0	0	0	706
T40C0Y0L910	0	0	0	910
T40C0Y0L1225	0	0	0	1225
T40C0Y0L1580	0	0	0	1580

*Características de la columna de sección cajón T40.*

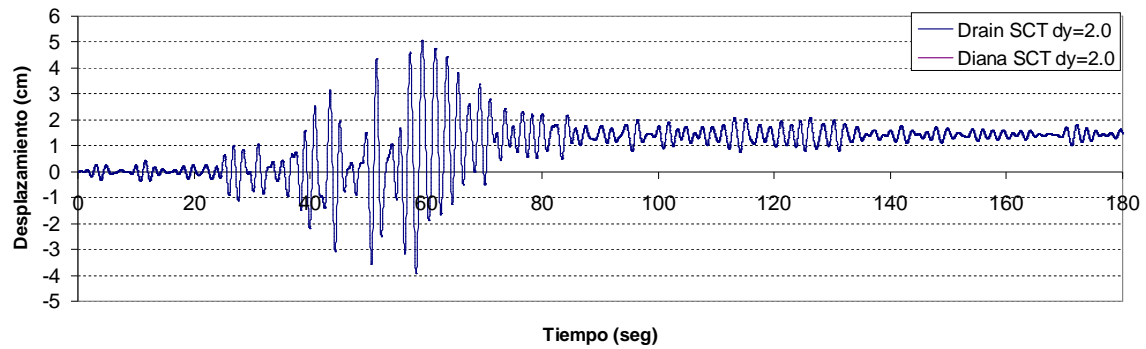
Finalmente se obtuvieron valores de curvatura plásticas máximas, curvaturas plásticas acumuladas, deformaciones plásticas acumuladas y rotaciones plásticas acumuladas, tanto positivas y negativas. Así como graficas desplazamiento, contra el tiempo, para diferentes niveles de desplazamiento lateral  $\delta y$ .

## Capítulo 5. Análisis de columnas ante carga dinámica

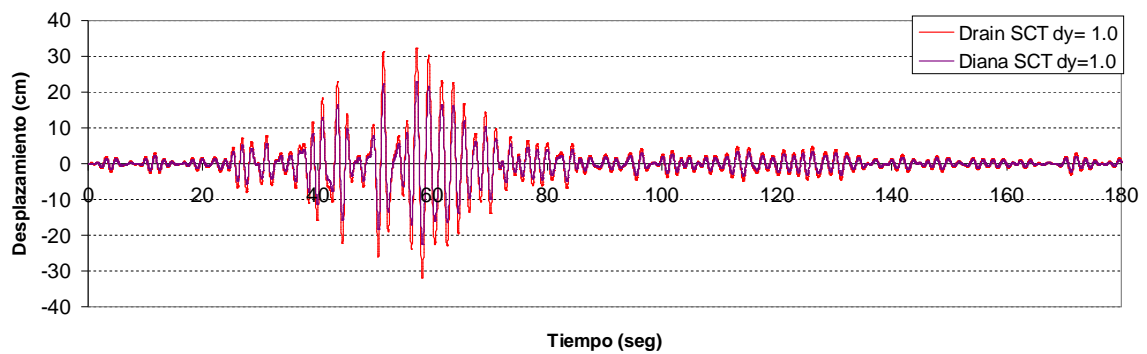
T20C5Y5 (SCT-EO)



T20C5Y5 (SCT-EO)

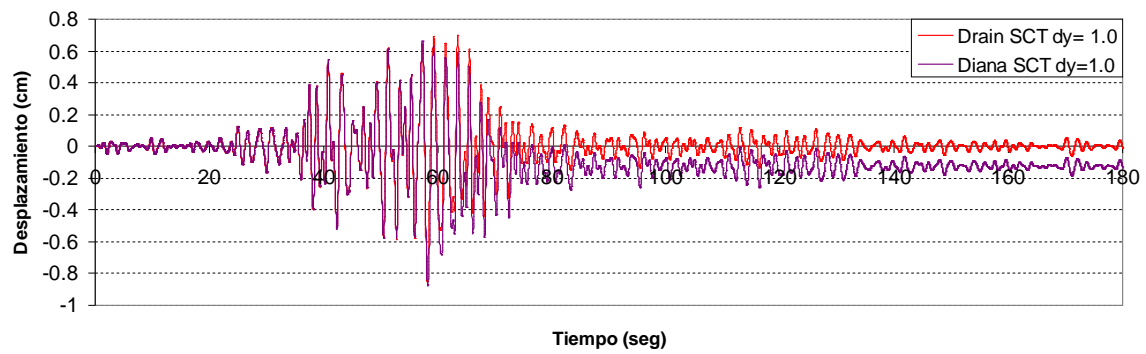


T20C5Y1 (SCT-EO)

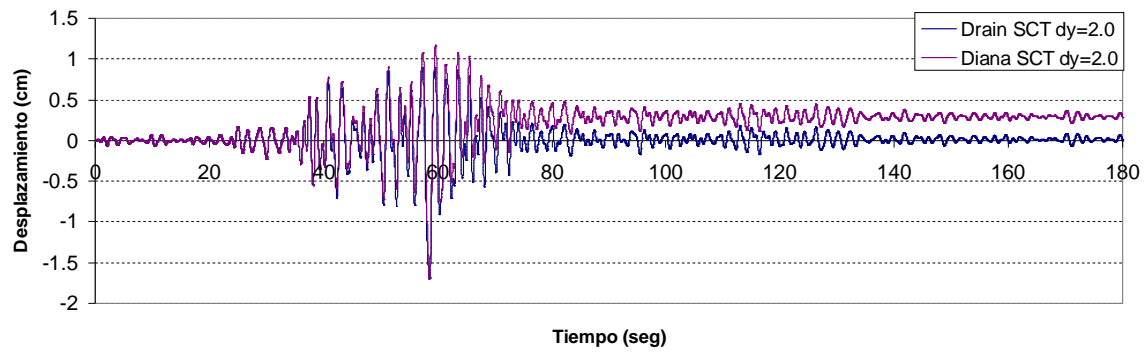


## Capítulo 5. Análisis de columnas ante carga dinámica

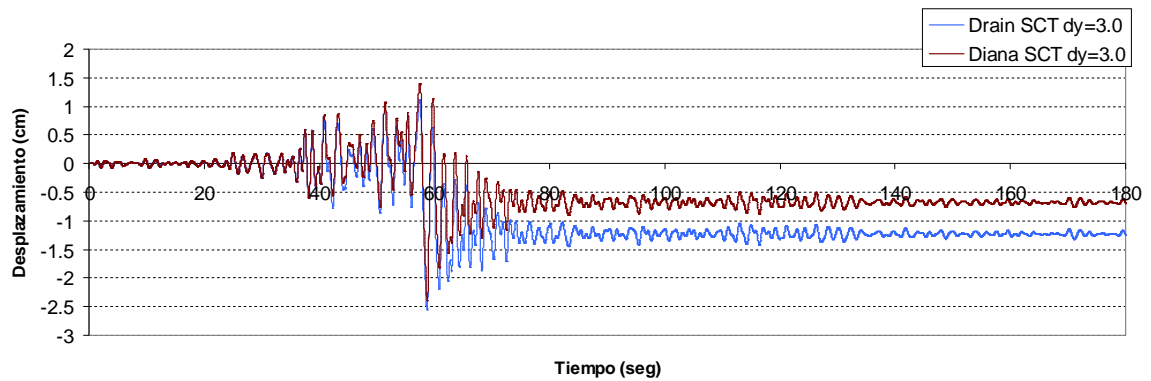
T20C1Y5 (SCT-EO)



T20C1Y5 (SCT-EO)

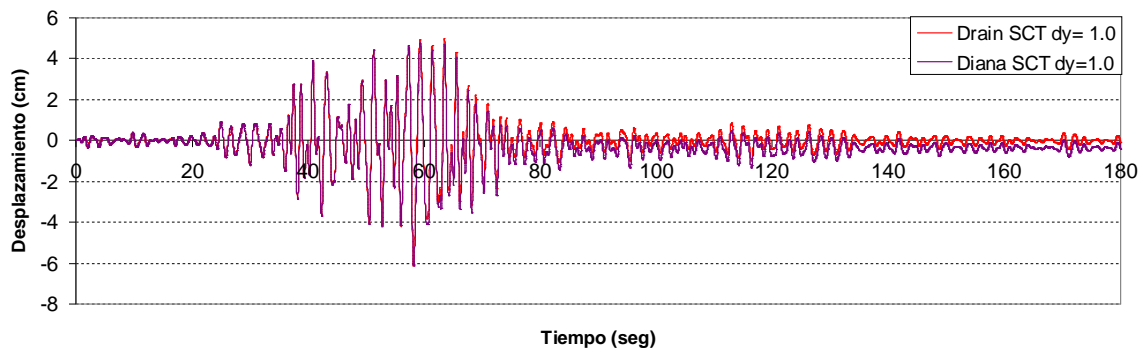


T20C1Y5 (SCT-EO)

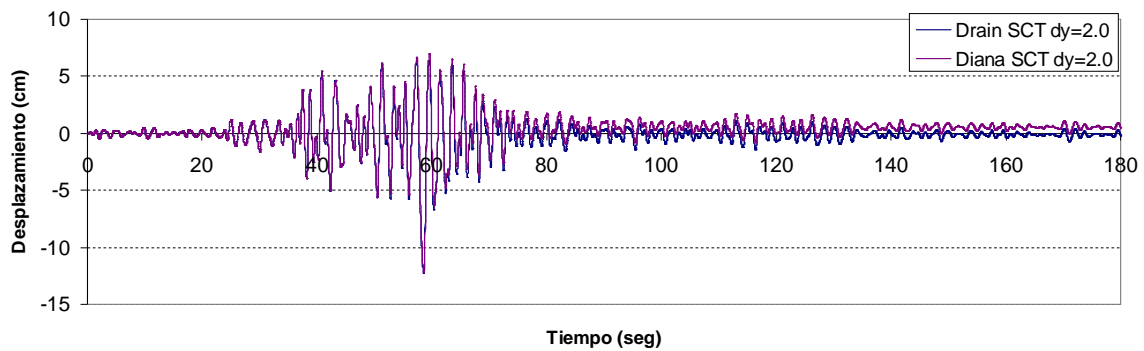


## Capítulo 5. Análisis de columnas ante carga dinámica

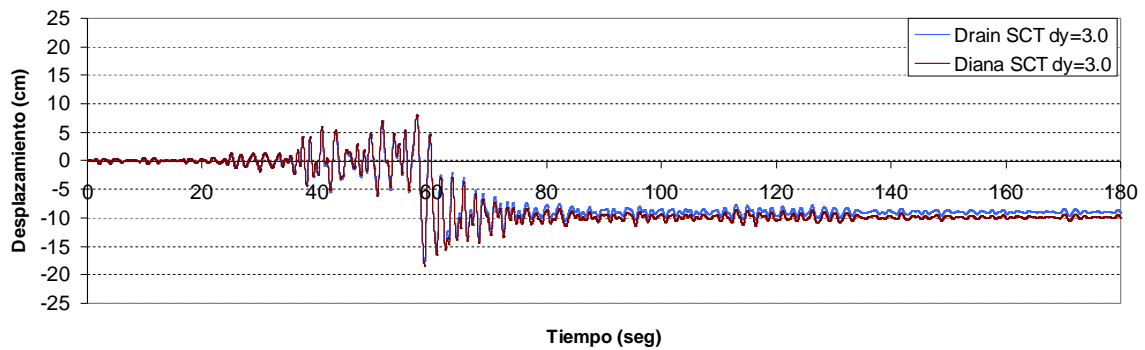
T20C1Y1 (SCT-EO)



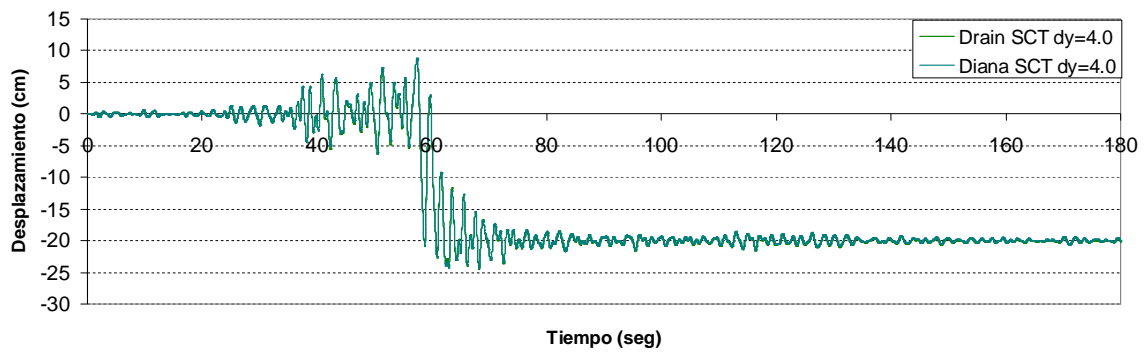
T20C1Y1 (SCT-EO)



T20C1Y1 (SCT-EO)

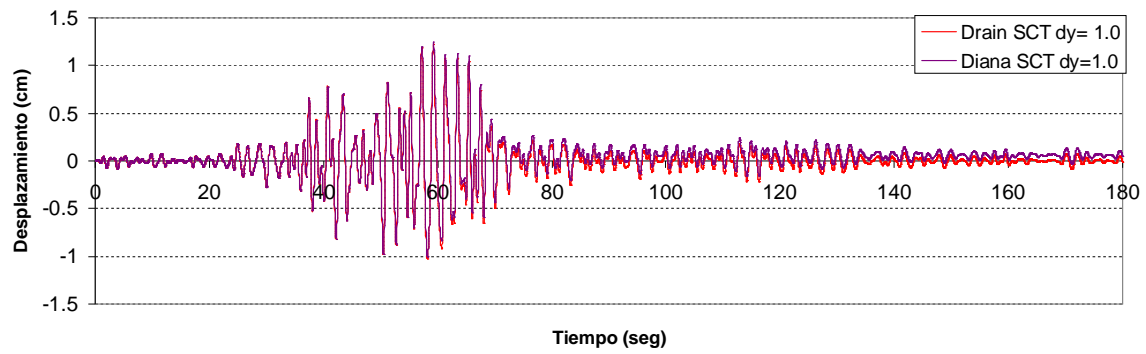


T20C1Y1 (SCT-EO)

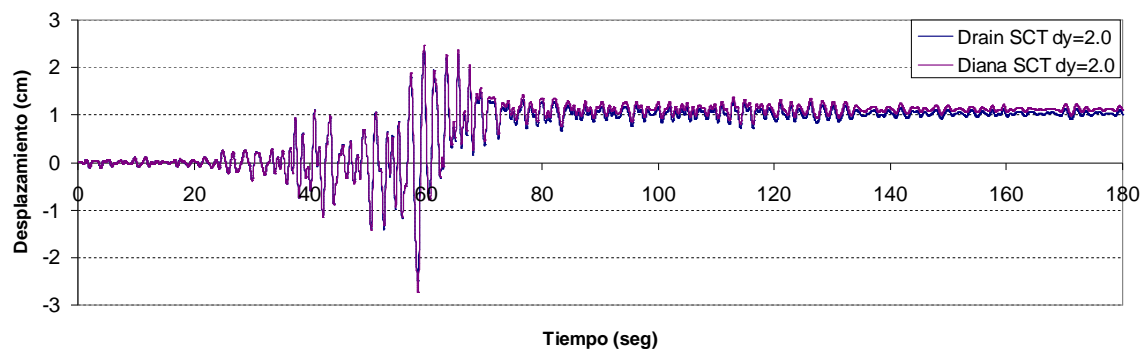


## Capítulo 5. Análisis de columnas ante carga dinámica

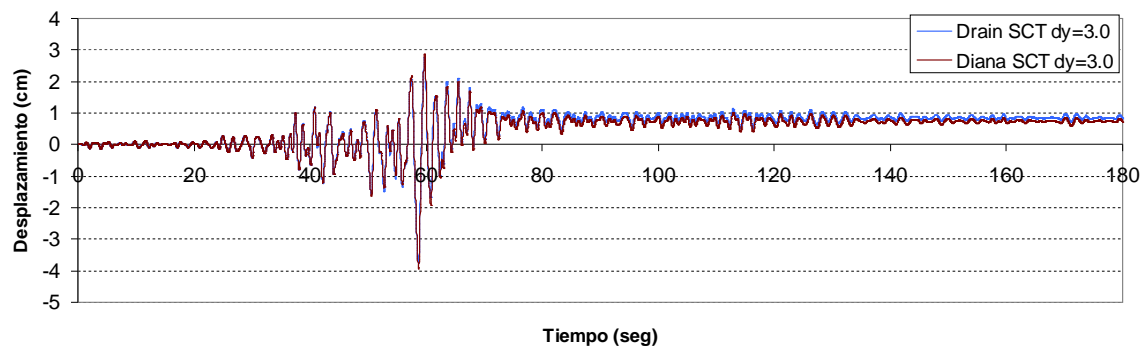
T20 C0Y0L160 (SCT-EO)



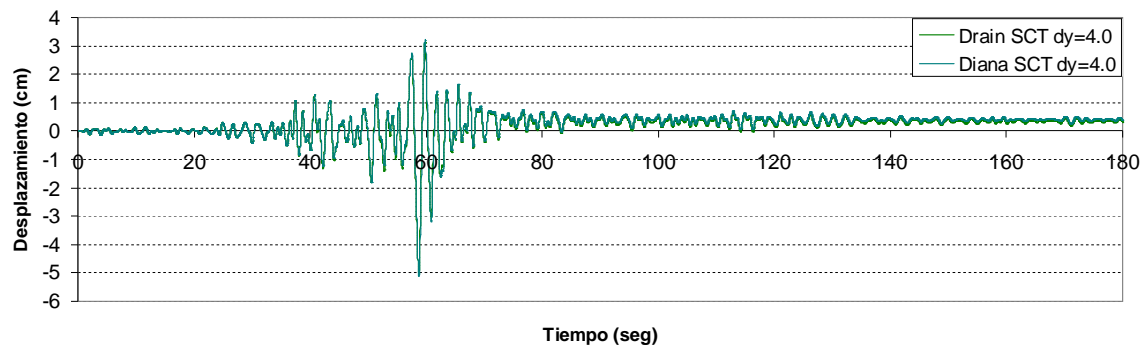
T20 C0Y0L160 (SCT-EO)



T20 C0Y0L160 (SCT-EO)



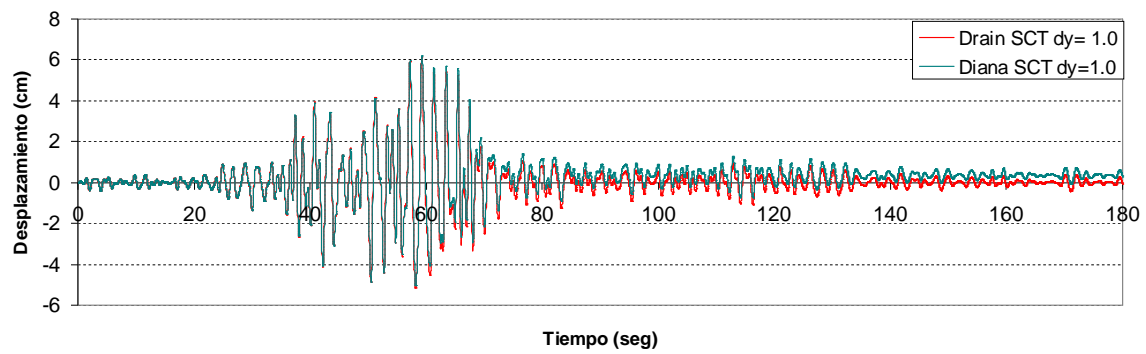
T20 C0Y0L160 (SCT-EO)



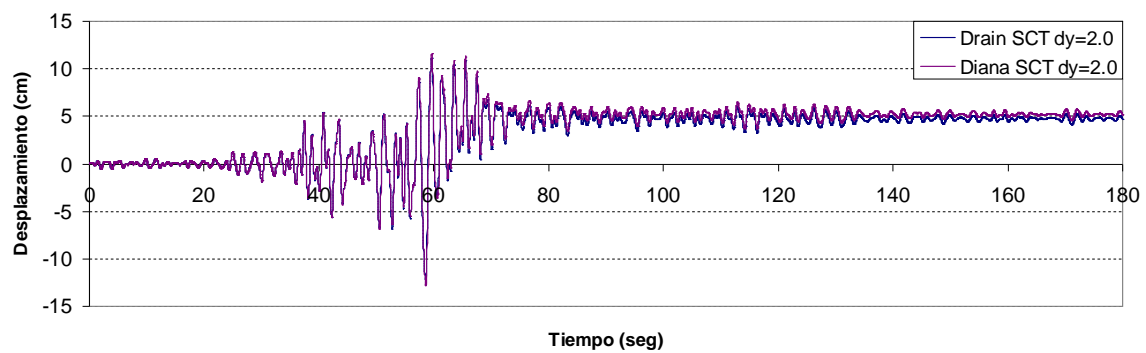


## Capítulo 5. Análisis de columnas ante carga dinámica

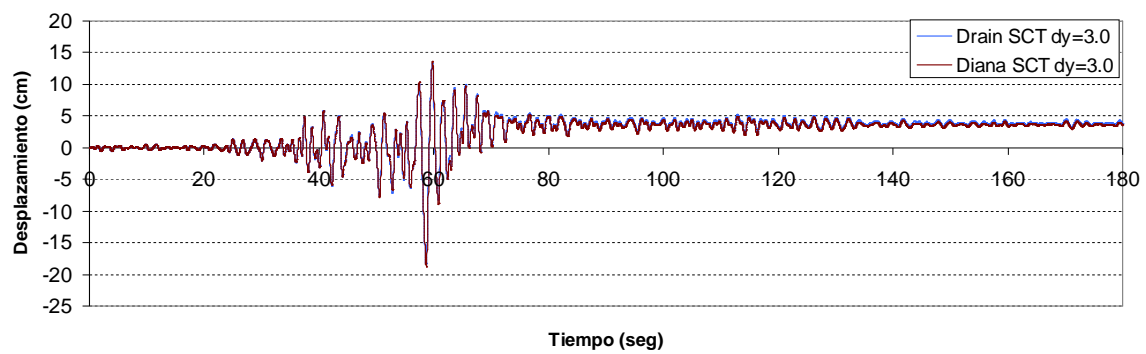
T20C0Y0L355 (SCT-EO)



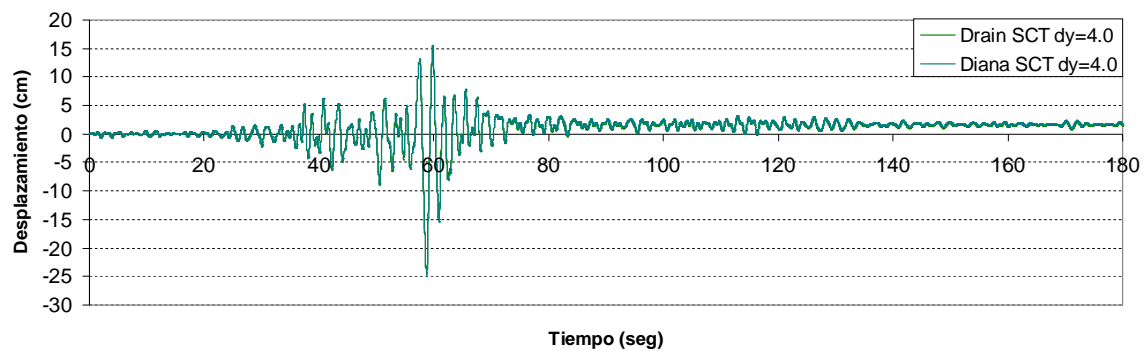
T20C0Y0L355 (SCT-EO)



T20C0Y0L355 (SCT-EO)

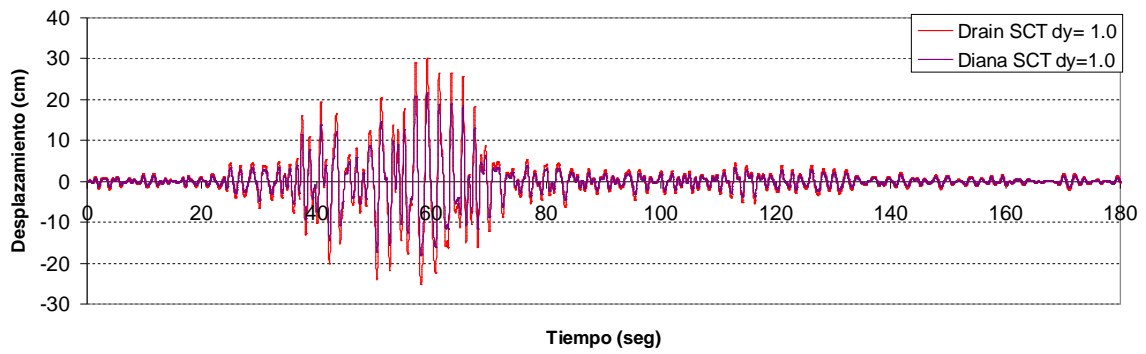


T20C0Y0L355 (SCT-EO)

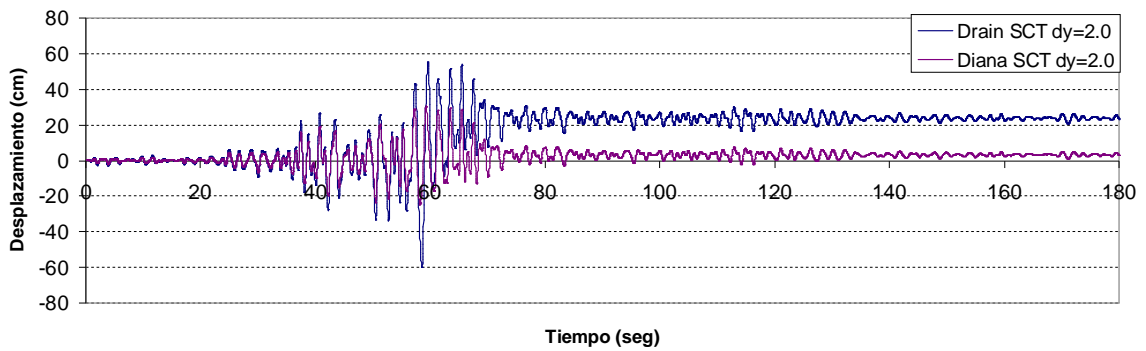


## Capítulo 5. Análisis de columnas ante carga dinámica

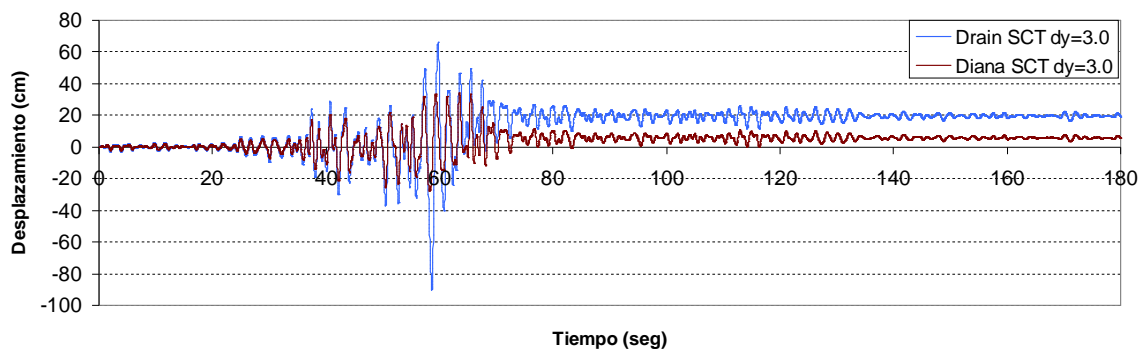
T20C0Y0L790 (SCT-EO)



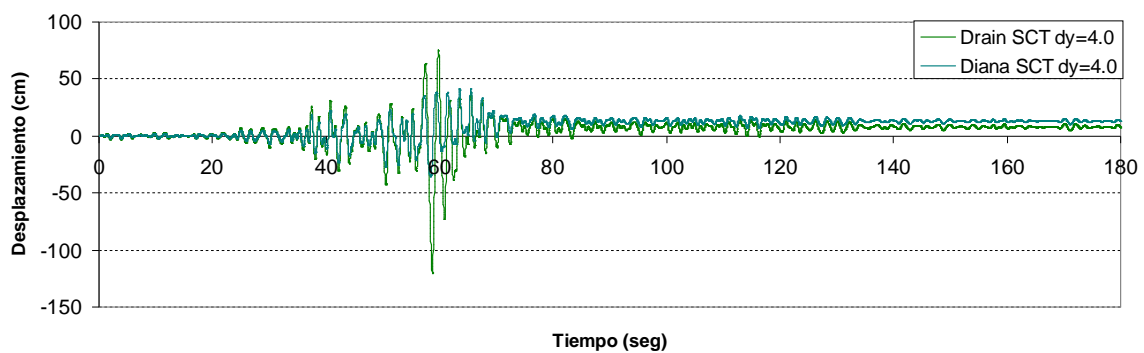
T20C0Y0L790 (SCT-EO)



T20C0Y0L790 (SCT-EO)



T20C0Y0L790 (SCT-EO)



## Capítulo 5. Análisis de columnas ante carga dinámica

Columna	Carga axial, P (kg)	P/Pcr	P/Py	Longitud (cm)		dy'	2dy'	3dy'	4dy'
T20C5Y5	62000	0.5	0.5	355	$\Psi_{pm\acute{a}x+}$	-	-	-	-
					$\Psi_{pm\acute{a}x-}$	-	-	-	-
					$\Psi_{pacu+}$	-	-	-	-
					$\Psi_{pacu-}$	-	-	-	-
					$\epsilon_{pacu+ (A,B)}$	-	-	-	-
					$\epsilon_{pm\acute{a}x- (A,B)}$	-	-	-	-
					$\theta_{pacu+}$	-	-	-	-
					$\theta_{pacu-}$	-	-	-	-
T20C5Y1	12400	0.5	0.1	790	$\Psi_{pm\acute{a}x+}$	-	-	-	-
					$\Psi_{pm\acute{a}x-}$	-	-	-	-
					$\Psi_{pacu+}$	-	-	-	-
					$\Psi_{pacu-}$	-	-	-	-
					$\epsilon_{pacu+ (A,B)}$	-	-	-	-
					$\epsilon_{pm\acute{a}x- (A,B)}$	-	-	-	-
					$\theta_{pacu+}$	-	-	-	-
					$\theta_{pacu-}$	-	-	-	-
T20C1Y5	62000	0.1	0.5	160	$\Psi_{pm\acute{a}x+}$	1.37E-05	3.35E-04	7.25E-04	-
					$\Psi_{pm\acute{a}x-}$	-4.48E-05	-9.06E-04	-3.16E-03	-
					$\Psi_{pacu+}$	1.42E-05	7.69E-04	4.68E-04	-
					$\Psi_{pacu-}$	-4.78E-05	-9.06E-04	-1.87E-03	-
					$\epsilon_{pacu+ (A,B)}$	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-
					$\epsilon_{pm\acute{a}x- (A,B)}$	-1.24E-03	-3.27E-02	-7.52E-02	-
					$\theta_{pacu+}$	0.00E+00	7.79E-03	1.26E-02	-
					$\theta_{pacu-}$	0.00E+00	-7.94E-03	-1.96E-02	-
T20C1Y1	12400	0.1	0.1	355	$\Psi_{pm\acute{a}x+}$	0.00E+00	3.07E-04	7.26E-04	1.12E-03
					$\Psi_{pm\acute{a}x-}$	-7.07E-05	-3.07E-03	-6.86E-03	-1.01E-02
					$\Psi_{pacu+}$	0.00E+00	7.59E-04	9.34E-04	1.38E-03
					$\Psi_{pacu-}$	-6.78E-05	-3.16E-03	-1.18E-02	-1.69E-02
					$\epsilon_{pacu+ (A,B)}$	3.26E-04	2.52E-02	5.72E-02	6.77E-02
					$\epsilon_{pm\acute{a}x- (A,B)}$	-1.09E-03	-3.62E-02	-8.14E-02	-1.35E-01
					$\theta_{pacu+}$	0.00E+00	1.98E-02	4.12E-02	4.38E-02
					$\theta_{pacu-}$	-5.65E-05	-2.01E-02	-6.44E-02	-9.55E-02
T20C0Y0L160	0	0	0	160	$\Psi_{pm\acute{a}x+}$	0.00E+00	1.49E-03	1.99E-03	2.44E-03
					$\Psi_{pm\acute{a}x-}$	8.25E-05	-1.83E-03	-3.36E-03	-4.87E-03
					$\Psi_{pacu+}$	9.52E-05	3.07E-03	4.29E-03	5.02E-03
					$\Psi_{pacu-}$	0.00E+00	-2.17E-03	-4.78E-03	-8.67E-03
					$\epsilon_{pacu+ (A,B)}$	8.25E-04	1.83E-02	3.35E-02	4.86E-02
					$\epsilon_{pm\acute{a}x- (A,B)}$	-8.26E-04	-1.84E-02	-3.36E-02	-4.87E-02
					$\theta_{pacu+}$	0.00E+00	2.16E-02	4.04E-02	6.32E-02
					$\theta_{pacu-}$	0.00E+00	-1.52E-02	-3.51E-02	-6.11E-02
T20C0Y0L355	0	0	0	355	$\Psi_{pm\acute{a}x+}$	1.11E-04	2.75E-03	3.90E-03	4.96E-03
					$\Psi_{pm\acute{a}x-}$	0.00E+00	-3.43E-03	-6.83E-03	-1.03E-02
					$\Psi_{pacu+}$	1.40E-04	5.07E-03	7.88E-03	9.30E-03
					$\Psi_{pacu-}$	0.00E+00	-3.81E-03	-8.88E-03	-1.76E-02
					$\epsilon_{pacu+ (A,B)}$	1.11E-03	3.43E-02	6.83E-02	1.03E-01
					$\epsilon_{pm\acute{a}x- (A,B)}$	-1.11E-03	-3.43E-02	-6.83E-02	-1.03E-01
					$\theta_{pacu+}$	1.78E-05	4.63E-02	8.77E-02	1.41E-01
					$\theta_{pacu-}$	0.00E+00	-3.29E-02	-7.68E-02	-1.37E-01
T20C0Y0L790	0	0	0	790	$\Psi_{pm\acute{a}x+}$	0.00E+00	1.82E-04	3.31E-04	7.55E-04
					$\Psi_{pm\acute{a}x-}$	0.00E+00	0.00E+00	-7.99E-05	-4.80E-04
					$\Psi_{pacu+}$	0.00E+00	3.00E-04	5.88E-04	1.28E-03
					$\Psi_{pacu-}$	0.00E+00	0.00E+00	-9.06E-05	-5.49E-04
					$\epsilon_{pacu+ (A,B)}$	0.00E+00	1.82E-03	3.31E-03	7.55E-03
					$\epsilon_{pm\acute{a}x- (A,B)}$	0.00E+00	-1.82E-03	-3.30E-03	-7.55E-03
					$\theta_{pacu+}$	0.00E+00	1.03E-01	1.94E-01	3.10E-01
					$\theta_{pacu-}$	0.00E+00	-7.29E-02	-1.70E-01	-3.00E-01

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

- El efecto de la carga axial en relación a la carga de fluencia, así como su valor con respecto a la carga de pandeo, son dos parámetros fundamentales para la caracterización del comportamiento plástico de las columnas.
- Se puede observar que, bajo cargas axiales importantes, se disminuye sustancialmente la magnitud de las curvaturas en la zona plástica de la columna, a cambio de una extensión considerable (de hasta el triple del caso sin carga axial) de la zona donde se desarrollan las plasticidades.
- Se puede ver la importancia de la consideración del efecto de la carga axial en la seguridad que se debe proporcionar en el diseño para que se pueda desarrollar satisfactoriamente el comportamiento plástico en una longitud adecuada de la columna.
- En las columnas con relación de  $d/d_y$  pequeño, se puede observar que el comportamiento en dichos ciclos de carga incremental es muy estable, por lo tanto el elemento no alcanza a plastificarse totalmente.
- En las columnas con un control de desplazamiento hasta 5 veces su deformación unitaria, el comportamiento en los ciclos de dichas columnas es muy inestable debido a que el elemento alcanza a plastificarse.
- Para relaciones de carga,  $P$ , con respecto a la carga de fluencia,  $P_y$ , muy grandes la plastificación se presenta en los primeros ciclos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bernal D. (1992), "**Dynamic instability in buildings subjected to earthquakes**", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No.8, pp.2239-2260.
- Bruneau, M., Uang, C.M., and Whittaker, A.S. (1997) "**Ductile Design of Steel Structures**", McGraw-Hill,
- Departamento del Distrito Federal, (2004), "**Normas técnicas complementarias de estructuras de acero**", Gaceta oficial del Distrito Federal.
- Hahn, G.D y Champlin B. P., (2000) "**Stability of Columns Under Combined Lateral and Vertical Loads**", 14a conferencia de ingeniería mecánica de la Universidad de Texas en Austin.
- Powell, G. H. y R. Allahabadi. (1988), "**Seismic Damage prediction by deterministic methods: Concepts and procedures**". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol 16, 719-734.
- TNO Building and Construction Research. (2005), "**DIANA 9.1, Finite Element Analysis Software**", Holanda.
- Gioncu, V. y M. Mazzolani (2002), "**Ductility of seismic resistant steel structures**". Ed. Spon press, Gran Bretaña.